

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria Química

Disseny i model dinàmic del sistema de calefacció d'un habitatge alimentat amb una pila PEM d'alta temperatura

MEMÒRIA

Autor:	Pau Martínez Molina
Director:	Maria Serra
Convocatòria:	Gener 2017



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



Resum

En aquest projecte es dissenya i es fa un model dinàmic de simulació d'un sistema de calefacció domèstic, corresponent a un habitatge de la ciutat de Barcelona, que s'alimenta amb un sistema de cogeneració basat en una pila PEM d'alta temperatura.

L'objectiu d'aquest projecte és determinar la viabilitat d'un sistema generador d'aquest tipus. Això es fa mitjançant un model que representi el funcionament del sistema i que disposi d'un sistema de control que reguli les entrades del sistema per mantenir la temperatura desitjada en l'habitatge.

Inicialment es realitza una recerca bibliogràfica teòrica per tal de documentar-se sobre el funcionament dels diferents sistemes que es pretenen implementar, i es desenvolupen uns apartats que reflecteixen aquests coneixements adquirits sobre piles de combustible i, més en concret, sobre piles PEM d'alta temperatura. També es realitza certa recerca sobre intercanviadors de calor i sistemes de refrigeració i calefacció.

Posteriorment, es procedeix a fer el model d'acord amb la teoria estudiada i de cara a emular un cas real, escollint de manera preliminar les dimensions dels diferents elements i assignant valors adients als paràmetres que determinen el funcionament del model. Un cop es disposa del model, es passa a realitzar un estudi en llaç obert dels resultats obtinguts, observant la resposta que tenen les diferents sortides del sistema a les pertorbacions que es poden donar en el funcionament quotidià d'un sistema semblant.

A partir de l'estudi en llaç obert, es pot extreure informació suficient de cara a la posterior determinació final dels paràmetres del sistema i al disseny d'un sistema de control, que reguli les entrades per tal que el sistema respongui a les pertorbacions que es presenten i ajustar les temperatures del sistema als setpoints que l'usuari desitja.

En aquest punt, es realitza un estudi en llaç tancat, observant primer la resposta de les variables del sistema a certes pertorbacions i posteriorment avaluant el sistema amb una simulació representativa d'un dia complet del mes de gener, el mes més fred de l'any, situant perfils de temperatura en les entrades i setpoints per emular al màxim les condicions reals.

Un cop es coneixen els resultats, es desenvolupa un estudi de l'impacte que tindria la implementació del sistema en els àmbits econòmic, ambiental i social, comparant-lo amb altres sistemes més habituals que s'utilitzen per aplicacions similars. Per últim, s'extreuen les conclusions en funció dels resultats observats i de la comparació amb els altres sistemes, avaluant si s'han complert els objectius proposats i resumint el conjunt d'idees que s'han pogut obtenir a partir de la realització d'aquest projecte.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	6
3. INTRODUCCIÓ I OBJECTIU	7
3.1. Introducció.....	7
3.2. Objectiu	8
3.3. Abast del projecte	9
4. CEL·LA DE COMBUSTIBLE I PEMFC D'ALTA TEMPERATURA	10
4.1. Què és una cel·la de combustible?.....	10
4.1.1. Avantatges i desavantatges de les piles de combustible	11
4.1.2. Tipus de cel·les de combustible	12
4.2. Piles de combustible PEM	13
4.2.1. Introducció a la química i la termodinàmica de les PEMFC	13
4.2.2. Tipus de cel·les PEM	15
4.2.2.1. Cel·les PEM de baixa temperatura (LT-PEMFC)	15
4.2.2.2. Cel·les PEM d'alta temperatura (HT-PEMFC)	17
5. COGENERACIÓ EN HT-PEMFC	20
5.1. Generació de potència elèctrica	20
5.2. Generació de potència calorífica	22
6. CAS D'ESTUDI	24
6.1. Descripció i demanda de calor de l'habitatge	24
6.2. Predisseny del sistema de generació d'energia (HT-PEMFC)	27
6.3. Predisseny del sistema refrigerant de la pila HT-PEMFC.....	30
6.4. Predisseny de l'intercanviador de calor líquid-líquid	33
6.5. Predisseny del sistema de calefacció domèstic.....	36
7. MODEL DINÀMIC DEL SISTEMA	39
7.1. Model del sistema de generació de potència.....	39
7.2. Model de l'intercanviador de calor líquid-líquid	41
7.3. Model del sistema de calefacció domèstic.....	42
7.4. Model integrat	43

8. DISSENY DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓ I DEL SISTEMA DE CONTROL	45
8.1. Determinació final dels paràmetres per al punt de treball nominal i el punt de treball crític.....	45
8.2. Anàlisi dels resultats de simulació en llaç obert.....	50
8.2.1. Resposta a una pertorbació en la temperatura exterior	51
8.2.2. Resposta a una pertorbació en el corrent de la pila	52
8.2.3. Resposta a una pertorbació en el cabal d'aigua refrigerant	53
8.2.4. Resposta a una pertorbació en el cabal d'aigua de calefacció.....	54
8.3. Definició del sistema de control	56
8.3.1. Determinació de les constants dels tres llaços de control pel mètode automàtic de Simulink	57
8.3.2. Determinació de les constants dels tres llaços de control pel mètode Ziegler-Nichols	58
8.3.2.1. Variant gràfica del mètode de Ziegler-Nichols	58
8.3.2.2. Variant numèrica del mètode de Ziegler-Nichols	59
8.3.3. Anàlisi numèric de les relacions entre els inputs i outputs escollits	60
8.3.3.1. Estudi de l'RGa del sistema	60
8.3.4. Determinació de les constants de dos llaços de control pel mètode automàtic de Simulink	61
8.4. Anàlisi dels resultats de simulació en llaç tancat	64
8.4.1. Resposta a una pertorbació en la temperatura exterior	65
8.4.2. Resposta a una pertorbació en la temperatura desitjada (setpoint)	70
8.4.3. Resposta a una perfil de temperatures exterior i de setpoint de l'habitatge	74
8.5. Conclusions de l'anàlisi del sistema en llaç tancat	82
9. ANÀLISI DE L'IMPACTE DEL SISTEMA	84
9.1. Impacte econòmic.....	84
9.2. Impacte ambiental i energètic	86
9.3. Impacte social	87
CONCLUSIONS	88
AGRAÏMENTS	90
BIBLIOGRAFIA	91

1. Glossari

A	Àrea activa d'una cel·la [m ²]
A_r	Àrea de contacte de refrigeració [m ²]
A_{int}	Àrea d'intercanvi de calor [m ²]
C_i	Concentració superficial del reactiu i [mol·m ⁻²]
$C_{p_{aire}}$	Calor específica de l'aire [J·K ⁻¹ ·m ⁻³] o [W·h·m ⁻³ ·K ⁻¹]
C_{p_i}	Calor específica del component i (r = refrigerant, w = aigua) [J·K ⁻¹ ·m ⁻³]
C_{pila}	Capacitat calorífica de la pila [J·K ⁻¹ ·Kg ⁻¹]
d_i	Diàmetre del tub pel qual flueix el component i [m ²]
n_{elem}	Nombre d'elements per radiador
F	Nombre de Faraday [C·mol ⁻¹]
G_c	Agrupacions de cel·les entre dos plats refrigerants
G_{per}	Coeficient global volumètric de pèrdues de l'habitatge [W·K ⁻¹ ·m ⁻³]
G_1	Coeficient volumètric de pèrdues per les parets de l'habitatge [W·K ⁻¹ ·m ⁻³]
G_2	Coeficient volumètric de pèrdues per ventilació de l'habitatge [W·K ⁻¹ ·m ⁻³]
I	Intensitat de corrent [A]
j	Densitat de corrent [A·m ⁻²]
k_i	Velocitat de reacció de la reacció i [s ⁻¹]
L	Longitud de l'intercanviador de calor líquid-líquid [m]
M_{pila}	Massa de la pila [Kg]
N_c	Nombre de cel·les de la pila
N_p	Nombre de plats de refrigeració
N_r	Nombre de radiadors de l'habitatge
n	Coeficient n dels radiadors
n_e	Nombre d'electrons intercanviats en la reacció
P_c	Potència calorífica [W]
P_{disp}	Potència disponible en el combustible de la pila [W]
P_e	Potència elèctrica [W]
P_{per}	Potència de pèrdues per les parets de l'habitatge [W]
P_r	Potència transferida cap al/del refrigerant [W]
P_{rad}	Potència transferida dels radiadors a l'habitatge [W]
Q_n	Potència nominal d'un element de radiador [W]
T_{hab}	Temperatura de l'habitació [K]
T_{i_x}	Temperatura del component i a la situació x (e = entrada, s = sortida) [K]
T_{∞}	Temperatura de l'exterior [K]
U_r	Coeficient global de transferència de calor a la refrigeració [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
U_{int}	Coeficient global de transferència de calor a l'intercanviador [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
v_i	Velocitat del component i [m·s ⁻¹]
v'_i	Cabal volumètric del component i [m ³ ·s ⁻¹]
V	Diferència de potencial d'una cel·la unitària [V]
V_i	Volum del tub del component i en l'intercanviador líquid-líquid [m ³]
V_{hab}	Volum de l'habitatge [m ³]
ΔT_n	Increment de temperatura nominal dels radiadors [K]

2. Prefaci

Aquest projecte forma part del projecte del MINECO MICAPEM, el qual té com a una de les principals finalitats optimitzar la gestió energètica d'un sistema autònom de microgeneració de potència elèctrica i calorífica basat en una pila PEM d'alta temperatura per a un habitatge aïllat.

En el projecte MICAPEM s'aborden diverses línies d'investigació corresponents a un sistema com aquest, com són la gestió de l'hidrogen, l'optimització del funcionament de la pila, la millora del disseny i dels materials emprats en aquesta, el disseny d'un sistema de control que en millori l'eficiència i n'allargui la vida útil, la demostració de la capacitat d'aquests sistemes d'assolir la demanda d'un sistema estacionari domèstic i per últim la gestió de la calor i la potència generades dins el propi habitatge per assegurar el bon funcionament en diferents punts d'operació.

Aquest projecte en particular pretén abordar part de l'operació de la pila, gestionant la calor generada per aquesta mitjançant un sistema de refrigeració. També realitzar la part de demostració de la capacitat d'aquests sistemes amb un disseny d'un sistema de calefacció per un habitatge, i el disseny d'un sistema de control inicial.

3. Introducció i objectiu

3.1. Introducció

Hi ha una preocupació global sobre l'efecte perjudicial cap al medi ambient dels mètodes de generació d'energia basats en els combustibles fòssils, i també força incertesa respecte la quantitat limitada d'aquestes fonts. Ambdós fets han causat la necessitat de desenvolupar mètodes de producció d'energia més sostenibles i ecològics.

Les piles de combustible de membrana d'intercanvi de protons (o PEMFC, per les seves sigles en anglès) poden cobrir aquesta necessitat de sistemes energètics més sostenibles, fet que depèn en gran part del mètode d'obtenció del seu combustible, l'hidrogen. Si l'hidrogen s'ha obtingut de manera sostenible, com per exemple mitjançant energies renovables, el procediment també ho serà, mentre que si el mètode d'obtenció no és sostenible, el balanç final del sistema no serà positiu.

Les PEMFC es basen en la transformació de l'energia química de l'hidrogen en energia elèctrica i calor, i tenen una eficiència superior als mètodes basats en combustibles fòssils per a l'obtenció d'energia elèctrica. A més, tenen un funcionament ecològic ja que el producte obtingut de la reacció química és aigua.

Durant els darrers anys s'ha dut a terme recerca extensiva sobre aquest nou mètode de generació d'energia, obtenint un ampli desenvolupament d'aquest sistema. S'han demostrat molts avantatges respecte els mètodes convencionals, com per exemple l'alta eficiència, les densitats de potència més altes, una arrancada ràpida i el ja mencionat sentit ecològic.

Les investigacions sobre les variables que tenen influència en la resposta de les piles PEM també han significat un gran progrés en la optimització de la seva eficiència. A més del disseny, els materials i la fabricació, variables com ara el cabal dels gasos reactius, la pressió, l'estequimetria o la gestió de la calor i l'aigua produïdes han demostrat ser crucials per tal de maximitzar la producció d'energia.

Degut al seu disseny modular simple, baix pes i la membrana d'electròlit sòlid, s'han considerat tant aplicacions mòbils com estacionàries per aquests sistemes, postulant-se realment com a possibles substituïts dels motors de combustió en automoció i de la xarxa elèctrica per fins domèstics.

Les cel·les PEM més conegudes són les que es coneixen com a cel·les PEM de baixa temperatura (LT-PEMFC), que han estat desenvolupades extensivament i avui en dia poden produir fàcilment altes densitats de potència a un cost relativament baix. Però aquest tipus de cel·les té nombrosos handicaps, com la necessitat d'una font d'hidrogen

molt pur degut a l'afinitat que el catalitzador presenta envers les impureses, les dificultats per aprofitar la calor generada amb gradients de temperatura tant baixos o la inundació de la membrana causada per l'aigua líquida, la qual fa baixar l'eficiència de la cel·la greument.

Aquests desavantatges condueixen la recerca al desenvolupament de piles PEM d'alta temperatura (HT-PEMFC), el rang d'operació de les quals es comprèn entre 100-200°C. Dins aquest rang, la calor generada es pot transferir amb facilitat amb un dispositiu refrigerant, creant així un sistema de cogeneració (en anglès, Combined Heat and Power o CHP) i incrementant l'eficiència considerablement.

Aquest tipus de cel·les utilitzen una membrana diferent que les de baixa temperatura, la qual és capaç d'operar sense aigua. A més, tota l'aigua present a la pila es presenta en vapor degut a la temperatura, evitant així inundacions. El problema de la intolerància a les impureses també es veu força solucionat ja que a altes temperatures l'afinitat del catalitzador envers aquestes és quantitativament menor, fet que permet emprar hidrogen menys pur, com el que s'obté d'un procés de reformat.

Tot i així, les cel·les PEM d'alta temperatura presenten lleugers desavantatges, com per exemple una arrancada més lenta o una durabilitat més curta degut a la degradació per temperatura, lixiviació d'àcid i aglomeració del catalitzador. Són aquests handicaps els que s'han d'intentar minimitzar mitjançant la investigació per tal d'incrementar la seva eficiència i vida útil i poder aspirar a substituir els sistemes més convencionals.

3.2. Objectiu

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar i alhora desenvolupar un model amb Simulink d'un sistema de calefacció d'un habitatge que aprofiti la calor subministrada per una pila PEM d'alta temperatura d'un sistema de microcogeneració. La potència elèctrica generada pel sistema de generació ha de ser consumida per l'habitatge o be injectada a la xarxa. En aquest model s'han de veure detallats els intercanvis de calor en el sistema refrigerant de la pila, en l'intercanvi entre el refrigerant de la pila i l'aigua de calefacció i en els radiadors del sistema de calefacció.

Per tal efecte, cal recercar informació sobre aquest tipus de cel·les, intercanviadors i sistemes de calefacció, i desenvolupar una situació hipotètica (cas d'estudi) que reflecteixi una aplicació real, amb uns paràmetres adequats i unes característiques pròpies. Tots els elements que conformen el sistema han de ser dimensionats de manera realista i s'han d'escollir les condicions d'operació, per així sotmetre el model a un anàlisi estacionari i dinàmic detallat.

La realització d'un estudi final focalitzat en l'impacte en diferents aspectes, com l'econòmic, l'ambiental i el social és essencial per tal de determinar la seva viabilitat i els

seus avantatges en comparació amb els sistemes convencionals emprats en aplicacions similars.

3.3. Abast del projecte

En aquest projecte es pretén obtenir les equacions i implementar el model de tot el sistema que es requereix per aprofitar la potència calorífica produïda per la pila PEM d'alta temperatura per a la calefacció d'una casa. Les dades de la pila que s'utilitzaran corresponen a una pila del laboratori de piles de l'IRII-UPC.

Per aquest fet es realitza una recerca bibliogràfica de cara a disposar del coneixement suficient per dur a terme aquest disseny, i que es plasma en els primers apartats del projecte, amb un ampli estudi sobre el funcionament de les piles de combustible i sobre els sistemes de cogeneració.

Posteriorment, es dissenyen els diferents sistemes de transferència de calor amb la finalitat d'aprofitar la calor generada. Inicialment cal dimensionar el sistema generador, corresponent a la pila PEM d'alta temperatura, i ajustar els sistemes de transferència de calor a aquesta. Aquests sistemes són el sistema de refrigeració de la pila, el d'un intercanviador de calor intermedi, i el sistema de calefacció de l'habitatge i per últim al sistema de control.

Finalment, s'estudia l'impacte corresponent a la implementació d'aquest sistema i, observant els resultats, s'extreuen conclusions sobre la viabilitat d'aplicació i es compara amb d'altres sistemes utilitzats per aplicacions semblants.

4. Cel·la de combustible i PEMFC d'alta temperatura

Aquest capítol conté una introducció a les cel·les de combustible i el seu funcionament. Posteriorment es profunditza a les cel·les PEM, en concret a les d'alta temperatura, que són les d'especial interès per al desenvolupament d'aquest projecte, mostrant les seves particularitats i característiques.

4.1. Què és una cel·la de combustible?

Les cel·les de combustible són dispositius destinats a obtenir potència elèctrica a partir de l'energia química d'un cabal de combustible. Però aquest fet no és quelcom impressionant, ja que diversos processos que s'han estat utilitzant durant molt de temps ja són capaços de fer-ho. La particularitat de les cel·les de combustible és poder assolir aquesta conversió d'energia en un sol pas gràcies a un procés electroquímic.

Per tal de fer-ho, una cel·la de combustible conté dos elèctrodes, un d'ells carregat negativament (ànode) i un altre positivament (càode). En aquests elèctrodes és on té lloc la reacció química, i els electrons alliberats en la reacció de l'ànode flueixen a través d'un circuit extern fins que arriben a l'oxidant i es dona la reacció del càode.

1800	W. Nicholson & A. Carlisle described the process of using electricity to break water.
1836	William Grove fuel cell demonstration.
1889	Separate teams: L. Mond & C. Langer / C. Wright & C. Thompson/ L. Cailletton & L. Colardeau performed various fuel cell experiments.
1893	F. Ostwald describes roles of fuel cell components.
1896	W. Jacques constructed a carbon battery.
Early 1900's	E. Baur and students conducted experiments on high temperature devices.
1960s	T. Grubb & L. Niedrach invented PEMFC technology at GE.
1990s - Present	Worldwide extensive fuel cell research on all fuel cell types.

Fig. 4.1. Història de les cel·les de combustible [1].

Per poder controlar aquests electrons, s'ha de deixar un cert espai entre l'ànode i el càtode. Aquest espai s'omple amb un electròlit, el qual permet que els ions flueixin entre el·lectrodes. Normalment les cel·les de combustible també requereixen la presència d'un catalitzador per tal que les reaccions en ambdós el·lectrodes (l'ànode i el càtode) succeeixin a velocitats adients.

Sir William Grove va inventar la primera cel·la de combustible l'any 1839, utilitzant la idea de recompondre l'aigua de William Nicholson i d'Anthony Carlisle. No es va realitzar massa recerca durant el segle XVIII i els inicis del segle XIX. L'any 1960 la NASA va retornar aquests sistemes a l'agenda de la comunitat científica, desencadenant una recerca extensiva realitzada durant les següents dècades, que va aconseguir convertir-los en un sistema viable per algunes aplicacions (Fig. 4.1) [1].

4.1.1. Avantatges i desavantatges de les piles de combustible

El motiu pel qual les cel·les de combustible són a l'agenda de la comunitat científica és la seva quantitat d'avantatges comparant amb els mètodes convencionals (motors de combustió, bateries). L'alta eficiència que ofereixen aquests dispositius comparat amb els sistemes comuns és un dels factors que els fa tant valuosos.

How fuel cell cars work

A fuel cell is a clean and efficient power plant that makes electricity through a chemical reaction between hydrogen and oxygen.

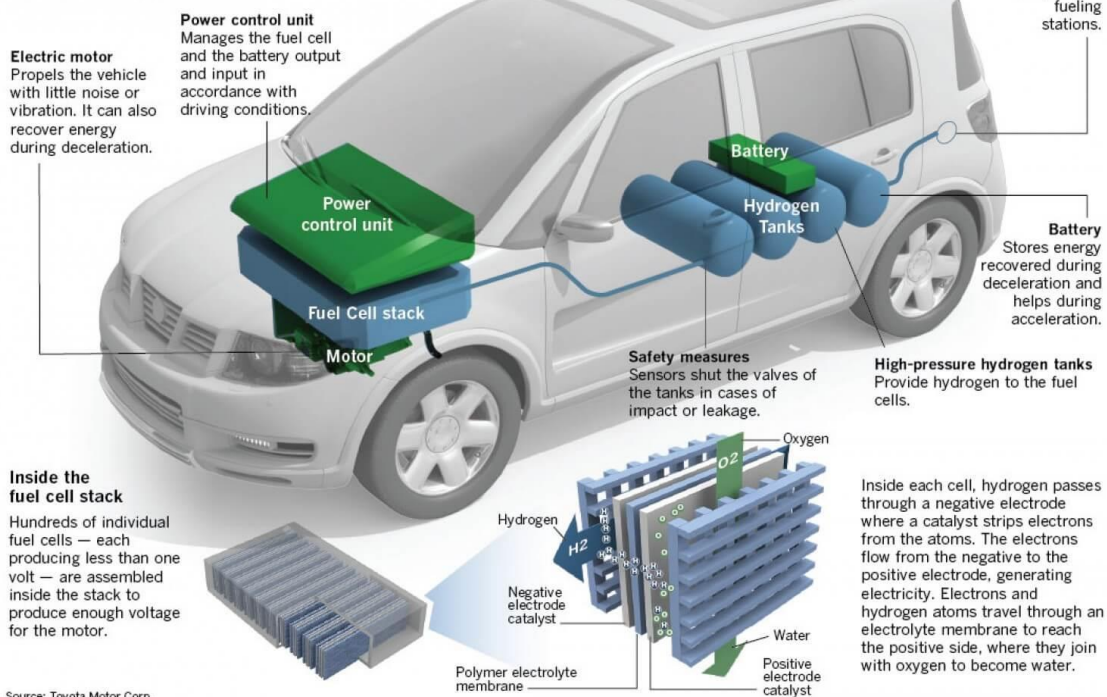


Fig. 4.2. Funcionament dels cotxes amb piles de combustible [37].

Juntament amb això, la possibilitat de tenir un rendiment continu durant un llarg període de temps i en un ampli rang de potències els fa quantitativament superiors a les bateries, ja que les cel·les de combustible no deixen de produir energia si no es para de

subministrar combustible. L'ampli ventall de potències que es pot assolir amb diferents estructures de piles, implica també un ampli ventall de dimensions i pesos, en funció de l'aplicació desitjada [1].

Un altre avantatge rau en l'estructura física de la cel·la. L'absència de parts mòbils fa que el funcionament sigui silenciós, redueix la necessitat de manteniment i al mateix temps incrementa la fiabilitat i el temps de vida útil d'aquests sistemes [2].

L'últim avantatge a mencionar es refereix al seu impacte ambiental. Degut que les cel·les de combustible operen amb hidrogen i aire i produeixen aigua, no s'emeten contaminants com per exemple compostos nitrogenats o sulfurats a l'atmosfera, donant-los un caràcter ecològic, que és un afer principal a les ciutats avui en dia. Tanmateix, les cel·les de combustible han de combatre alguns factors importants que confronten tots aquests avantatges i que compliquen la possibilitat d'utilitzar-les en moltes aplicacions. Aquests són liderats per l'alt cost dels materials requerits, que impossibilita que competeixin amb altres mètodes, i els materials de baix cost no semblen ser uns substituïts vàlids.

També es troben algunes barreres en relació al combustible, ja que l'hidrogen no es troba ni es pot emmagatzemar amb facilitat, i el reformat d'altres combustibles per produir-lo representa un increment en el cost i una disminució en l'eficiència del sistema [3]. A més, l'ús d'altres combustibles també implicaria un decrement de la vida útil de la cel·la, degut a la degradació del catalitzador i l'enverinament de l'electròlit.

S'ha de trobar solucions a aquests desavantatges per tal de fer competitius aquests sistemes al mercat, convertint-los en potencials substituïts per molts mètodes convencionals que no ofereixen tants avantatges ni un catàleg tant ampli d'aplicacions diferents.

4.1.2. Tipus de cel·les de combustible

Les cel·les de combustible es divideixen en grups en funció del seu electròlit, que també determina algunes de les seves característiques (Taula 4.1) com per exemple els materials o les temperatures d'operació. Majoritàriament n'hi ha de cinc tipus: d'àcid fosfòric (PAFC), de membrana d'intercanvi de protons (PEMFC), alcalines (AFC), de carbonat fos (MCFC) i de sòlid-òxid (SOFC) [2][4].

	PEMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
Electrolyte	Polymer membrane	Liquid H_3PO_4 (immobilized)	Liquid KOH (immobilized)	Molten Carbonate	Ceramic
Charge Carrier	H^+	H^+	OH^-	CO_3^{2-}	O^{2-}
Operating temperature	80°C	200°C	60-220°C	650°C	600-1000°C
Catalyst	Platinum	Platinum	Platinum	Nickel	Perovskites (ceramic)
Cell components	Carbon based	Carbon based	Carbon based	Stainless based	Ceramic based
Fuel compatibility	H_2 , methanol	H_2	H_2	H_2 , CH_4	H_2 , CH_4 , CO

Taula 4.1. Descripció dels tipus de cel·les més importants [2].

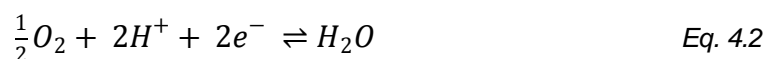
4.2. Piles de combustible PEM

4.2.1. Introducció a la química i la termodinàmica de les PEMFC

D'entre tots els tipus de cel·les de combustible, les piles PEM són les més atractives gràcies a la seva simplicitat, viabilitat, arrancada ràpida i ampli rang d'aplicacions. La particularitat més important d'aquestes cel·les rau en el seu electròlit, que consisteix en una membrana situada entre els elèctrodes porosos.

Aquesta membrana té la capacitat de conduir protons des de l'ànode fins al càtode, i és impermeable als gasos. A la interfase entre aquesta membrana i els elèctrodes de carboni hi ha una capa de catalitzador, que normalment és platí amb un suport de carboni. L'estructura física que engloba la membrana, els elèctrodes i el catalitzador es coneix com assemblatge de membrana i elèctrode (MEA).

A la superfície del catalitzador de platí-carboni és on les reaccions químiques tenen lloc. Aquestes reaccions són les semi-reaccions de combustió de l'hidrogen:



L'hidrogen flueix per la unitat de l'ànode i es dissocia en electrons i protons (Eq. 4.1), els quals viatgen a través de l'electròlit fins el càtode, desencadenant la semi-reacció de reducció (Eq. 4.2) en presència d'oxigen i del flux d'electrons.

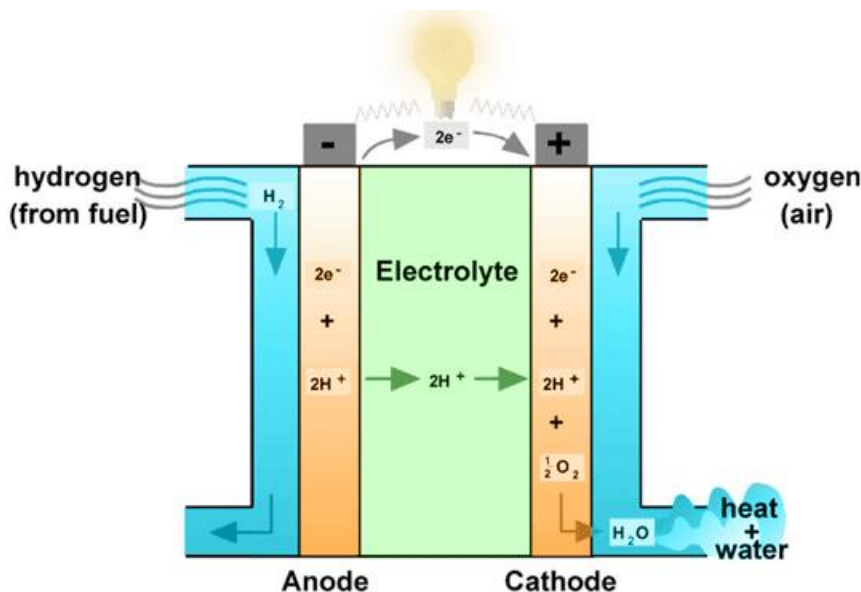


Fig. 4.3. Esquema d'operació d'una cel·la PEM [38].

Com a producte d'aquesta reacció s'obté aigua, i la gestió d'aquesta és un factor important per al funcionament de la cel·la. La majoria d'aquesta aigua s'expulsa com a part del flux de sortida juntament amb el flux d'excés d'oxigen (i de nitrogen si s'utilitza aire com a agent oxidant).

Un altre producte és la calor generada per les reaccions químiques, que pot ser un problema potencial pel funcionament de la cel·la però també una font d'energia si es realitza un tractament adequat (Fig. 4.3).

L'energia generada per la reacció és coneguda com a entalpia de reacció, la qual pot ser senzillament calculada amb les calors de formació dels reactius i els productes.

$$\Delta H = (h_f)_{H_2O} - (h_f)_{H_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{O_2} = (h_f)_{H_2O} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Com es mostra en l'equació superior (Eq. 4.4), l'energia generada és igual a l'energia de formació de l'aigua, ja que l'energia de formació d'un element pur és zero. La calor de formació de l'aigua té dos valors en funció de l'estat final de l'aigua, que pot ser líquida o vapor. Aquests valors són $-286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ quan es forma aigua líquida i $-241 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ quan es forma vapor d'aigua (ambdós valors a 25°C) [4].

Tanmateix, no es pot convertir tota l'energia disponible a electricitat. Com a cada reacció química, hi ha una porció d'aquesta energia que no es pot aprofitar degut a la generació d'entropia. La part que finalment es pot convertir correspon a l'energia lliure de Gibbs.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \text{Eq. 4.5}$$

A 25°C , dels $286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ d'energia disponible en produir aigua líquida, només $237 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ es poden utilitzar per produir electricitat, i els $49 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ restants es converteixen en calor. En produir vapor d'aigua, aquest valor decreix fins als $229 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ [4].

Degut que l'energia lliure de Gibbs és coneguda, el potencial de la cel·la es pot calcular amb l'expressió següent (Eq. 4.6):

$$E = \Delta G / F \cdot n \quad \text{Eq. 4.6}$$

Els valors de n i de F també són coneguts, i a 25°C i amb aigua líquida com a producte, el potencial de la cel·la és de 1,23 Volts, i si s'obté vapor d'aigua, el valor és de 1,19 Volts, contra els 1,482 i 1,254 V que es poden obtenir com a màxim de l'hidrogen [4].

Amb l'energia lliure de Gibbs també es pot calcular l'eficiència teòrica, la qual compara l'energia convertida en electricitat amb l'energia total aportada amb el combustible. L'eficiència teòrica a 25°C , d'acord amb els valors obtinguts prèviament, és d'un 83% en produir aigua líquida i d'un 95% en produir vapor d'aigua (Eq. 4.7).

$$\eta = \Delta G / \Delta H \quad \text{Eq. 4.7}$$

Tots els valors obtinguts sofreixen canvis substancials amb l'efecte de la temperatura, obtenint majoritàriament valors més baixos en l'energia disponible (ΔH), l'energia lliure de Gibbs (ΔG), entropia (ΔS) i potencial de la cel·la (E) quan la temperatura és més alta (Fig. 4.4).

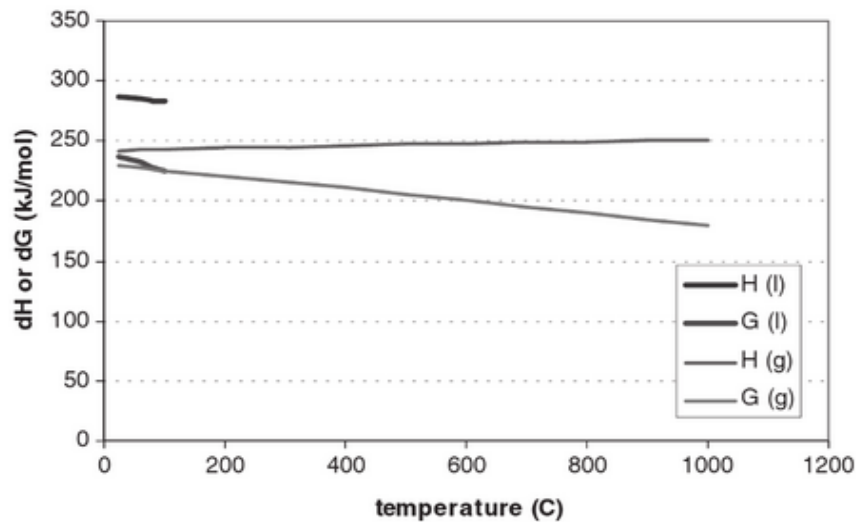


Fig. 4.4. Entàlpia i energia lliure de Gibbs d'una cel·la de combustible hidrogen/oxigen en funció de la temperatura [4].

4.2.2. Tipus de cel·les PEM

En funció de la temperatura d'operació de les cel·les PEM, aquestes es poden dividir en dos tipus de cel·les, les propietats de les quals són quantitativament diferents. Aquestes són les cel·les PEM de baixa temperatura i les cel·les PEM d'alta temperatura.

4.2.2.1. Cel·les PEM de baixa temperatura (LT-PEMFC)

Tal com el nom diu, les cel·les PEM de baixa temperatura són les que operen a temperatures més baixes, normalment compreses entre 60 i 80°C. La necessitat d'operar en aquest rang té una influència massiva en el disseny dels components de la cel·la, que hauran de complir els requeriments necessaris per obtenir resultats òptims.

Entre tots aquests components, el més complex és la membrana. Com ja s'ha mencionat, la seva funció principal és la de conduir els protons de l'ànode al càtode, fet que implica que ha de tenir una conductivitat considerablement alta a aquests, però en canvi ser impermeable als gasos, per tal d'evitar la mescla de les espècies reactants.

Tanmateix, la influència més important de la temperatura en el disseny de la membrana es troba en el contingut d'aigua. Com que les temperatures són al voltant de 80°C, l'aigua obtinguda de la reacció es presenta en estat líquid a pressió atmosfèrica, fet que afegit al

vapor d'aigua present en els fluxos dels reactius (si aquests són humits), conforma el contingut total d'aigua.

Aquest contingut d'aigua és de gran importància ja que és l'encarregada de transportar els protons a través de la membrana, és per això que la membrana requereix certa hidratació per obtenir valors correctes de conductivitat. D'altra banda, un excés d'aigua a la pila pot causar inundacions als porus de les capes catalitzadores i difusores, conduint a una falta de reactivitat ja que una part de la superfície activa de reacció queda bloquejada, o a una disminució de voltatge ja que hi ha més pèrdues per transport dels gasos.

Per complir aquestes condicions, el més comú és utilitzar membranes fetes de ionòmers perfluorocarbonats-àcid sulfònic (PSA). Entre aquests compostos, el material més conegut és el Nafion™ (Dupont) [4]. Aquest compost és un copolímer amb una cadena principal altament hidrofòbica i una cadena secundària acabada amb un grup SO_3H

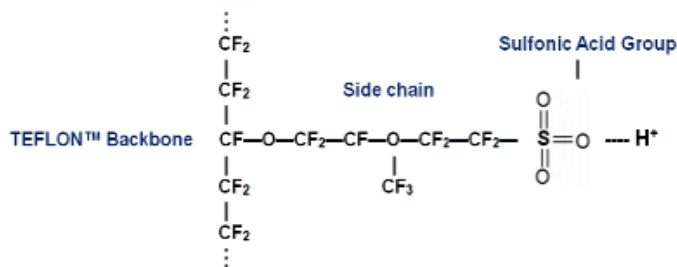


Fig. 4.5. Molècula de Nafion™ [39].

enllaçat iònicament, el qual és altament hidrofílic (Fig. 4.5). Aquest material equilibra tots els requeriments mencionats i ofereix el millor funcionament entre totes les possibilitats.

Uns altres elements importants són els elèctrodes de la cel·la, un a cada costat d'aquesta. Aquests elements consisteixen en una capa prima de catalitzador situada entre la membrana i els fluxos de gasos reactius, i són el lloc on les reaccions es duen a terme. Majoritàriament la capa de catalitzador està feta de platí, i es situa a la superfície d'un suport de carboni.

Antigament s'utilitzaven quantitats enormes de platí en aquestes capes de catalitzador, però s'ha realitzat molta recerca en la direcció de reduir aquestes quantitats i, en conseqüència, el preu de la cel·la de combustible. Actualment s'utilitzen partícules molt més petites però amb superfícies específiques molt elevades, amb les quals s'obté una àrea activa de catalitzador més alta amb una quantitat de platí més baixa (Fig. 4.6).

Tot i que el platí està lluny de ser el catalitzador ideal, no es disposa d'alternatives serioses per substituir-lo. La recerca futura es concentra en trobar un material que ha de ser més barat, amb

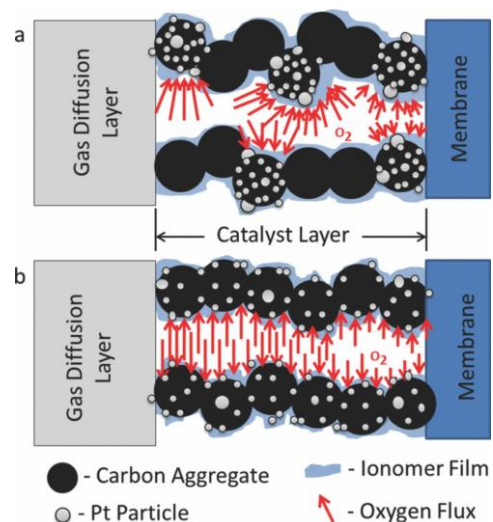


Fig. 4.6. Impacte de la càrrega de platí i de l'estructura de la capa de catalitzador en el funcionament d'una PEMFC [40].

més activitat i també menys afinitat a les impureses que empitjoren el funcionament.

Per tal que la reacció es dugui a terme, els gasos reactius han d'arribar a la superfície del catalitzador, i aquest és l'objectiu principal de la capa de difusió de gasos. Aquesta ha de ser una capa porosa principalment per permetre que els gasos flueixin a través d'ella, però també per permetre que surtin l'aigua, la calor i els electrons generats.

Per tots aquests motius, el material requerit ha de ser suficientment porós, conductor elèctric i tèrmic i preferiblement hidrofòbic. A més a més, ha de tenir certes propietats mecàniques per suportar la MEA. Normalment, s'escullen materials basats en fibres de carboni [4].

Estranyament s'utilitzen cel·les de combustible individuals, i és més comú trobar assemblatges de cel·les en sèrie creant una pila. En aquest cas, es necessita un ítem per separar una cel·la de l'adjacent. Aquest element es coneix com a placa bipolar. Les seves funcions principals són la de connectar les cel·les elèctricament, separar els fluxos de gas de dues cel·les consecutives, mantenir l'estructura de la pila, conduir la calor generada i hostatjar els canals de flux. Per tots aquests requeriments, el material seleccionat habitualment és el grafit.

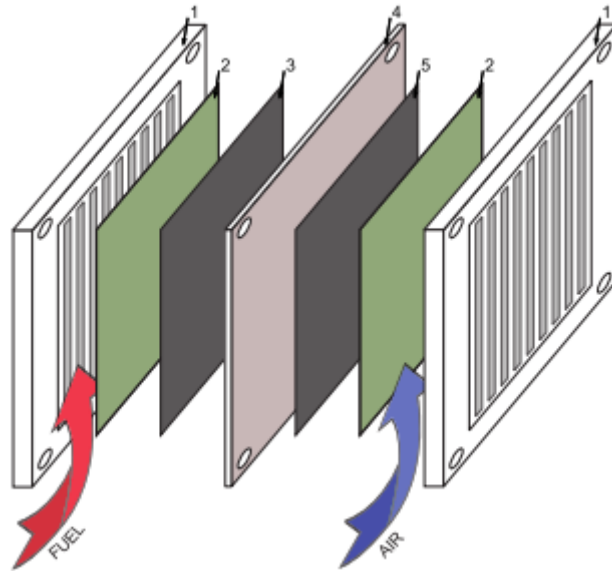


Fig. 4.7. Components típics d'una cel·la de combustible: 1 – plaques bipolars, 2 – capes de difusió de gasos, 3 – catalitzador de l'ànode, 4 – electròlit (membrana), 5 – catalitzador del càtode [41].

L'element final a mencionar de les piles PEM de baixa temperatura és el sistema de refrigeració, que és especialment interessant per aquest projecte. Degut que sobre un 50% de l'energia es produeix en forma de calor, hi ha cert risc de sobreescalfament, fet que podria degradar els materials severament. Per evitar aquest fet, la calor produïda s'ha d'extreure de la pila ràpidament amb un sistema especialitzat de refrigeració.

4.2.2.2. Cel·les PEM d'alta temperatura (HT-PEMFC)

Degut que moltes de les condicions necessàries en les LT-PEMFC no són fàcils de complir i requereixen d'un control sever i alts costos, la comunitat científica es condueix a la recerca d'alternatives. Una possible solució passa per augmentar la temperatura, factor que solucionaria força problemes que es donen a temperatures més baixes, però això requereix un replantejament de l'estructura. Les cel·les PEM d'alta temperatura són

governades pel mateix concepte d'operació, però inclouen canvis substancials en els components principals, ja que la seva temperatura d'operació és entre 100 i 200°C.

En augmentar la temperatura per sobre dels 80°C, la membrana de Nafion™ perd l'aigua i per tant la seva conductivitat, fet que la incapacita com a electròlit. Per aquest motiu, és necessari trobar un material alternatiu que respongui a les temperatures en qüestió. A partir d'estudis científics s'han obtingut diverses possibilitats, però tot apunta que el candidat més vàlid avui en dia és el polibenzimidazole (PBI) dopat amb àcid fosfòric.

El polibenzimidazole s'obté a partir de la polimerització d'una diamina adequada amb l'àcid carboxílic en àcid polifosfòric a 180-200°C. Aquest material, emprant àcid fosfòric per transportar els protons, presenta una conductivitat molt bona dins el rang de temperatures de treball. A més, aquest presenta diferents variants més específiques que podrien millorar encara més el funcionament.

Però el principal inconvenient d'aquest tipus de membranes ve donat per aquesta necessitat d'utilitzar àcid fosfòric com a agent conductor. La presència d'un àcid pot causar la lixiviació d'aquest en la membrana, obtenint

com a conseqüència principal la degradació dels components que conformen la cel·la, fet que fa disminuir la densitat de potència generada i també l'eficiència del sistema.

Pel que fa a l'elèctrode, l'augment de la temperatura implica múltiples avantatges respecte les cel·les de baixa temperatura. En un principi, si es parteix de la base de mantenir el platí com a catalitzador, l'increment de la temperatura implica dos principals efectes, l'augment de la tolerància del platí respecte a les impureses i la millora de la cinètica de la reacció de reducció de l'oxigen (ORR) [5].

El primer efecte és crucial per solucionar un dels problemes que presenten les cel·les de baixa temperatura, que és la necessitat d'hidrogen d'alta puresa, difícil d'obtenir i d'emmagatzemar. En augmentar la tolerància a les impureses, s'obre la possibilitat d'emprar com a combustible hidrogen provinent del reformat d'hidrocarburs (etanol, metanol) [6].

Pel que fa al segon, la cinètica lenta de la ORR en les cel·les de baixa temperatura era un factor limitant i causant de pèrdues, i requeria d'una gran quantitat de catalitzador,

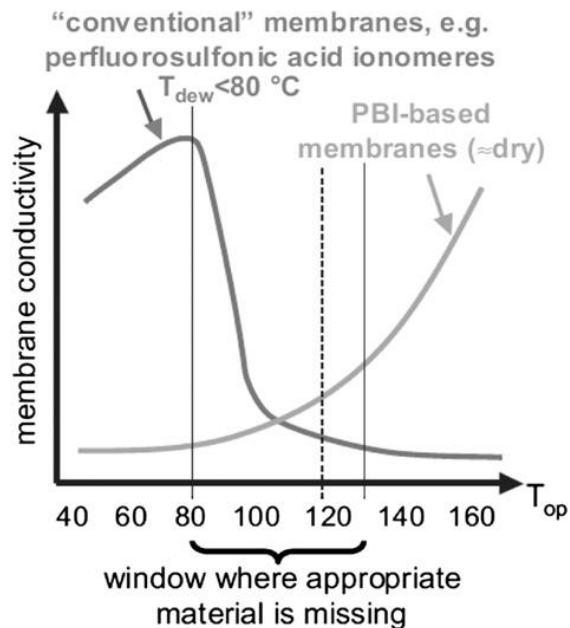


Fig. 4.8. Comparació de la conductivitat del Nafion™ amb el PBI en funció de la temperatura [5].

augmentant així el cost total de la cel·la. En augmentar la velocitat de la ORR, es veu molt incrementada l'eficiència de la cel·la, i es pot reduir la quantitat de catalitzador present en els elèctrodes.

Però aquest increment en la velocitat de reacció de la ORR pot arribar a significar que no faci falta emprar platí com a catalitzador. Diversos estudis mostren com materials alternatius, alguns d'ells compostos del platí amb altres metalls, i d'altres compostos lliures de platí es postulen com a possibles substituïts. Aquest fet implicaria un descens significatiu en el cost de les cel·les, que és un dels factors determinants per poder ser competitiu al mercat [5].

La resta d'elements que conformen la cel·la no difereixen massa dels elements utilitzats en les cel·les de baixa temperatura, simplement cal tenir en compte que en aquest cas no s'haurà de fer una gestió de l'aigua com a component present en dues fases, ja que tota l'aigua existent serà vapor, facilitant així el procés de gestió d'aquesta.

Malgrat la gran quantitat d'avantatges que aquest tipus de cel·les presenta, cal mencionar un dels inconvenients més greus que s'ha de combatre. La necessitat de treballar a temperatures per sobre dels 120°C implica que l'arrancada d'aquests sistemes és molt més lenta que en el cas dels sistemes de baixa temperatura. Aquest fet impossibilita l'ús d'aquest tipus de cel·les quan es requereix una resposta ràpida a una demanda energètica a menys que s'acobli un sistema que mantingui la temperatura de la pila elevada, fet que implica un descens en l'eficiència del sistema [7].

Per contra, un cop assolida la temperatura de treball, aquestes piles presenten una facilitat molt més elevada per extreure la calor generada, ja que el gradient de temperatures amb l'exterior és considerablement major. Això implica que els sistemes de refrigeració no requereixen una estructura tant complexa, i s'obre la porta a la possibilitat d'aplicar un sistema de cogeneració (en anglès, combined heat and power o CHP), en el qual a més d'aprofitar l'energia elèctrica generada, també s'utilitza la calor. L'aplicació d'un sistema de CHP implica un augment massiu en l'eficiència de la pila, obtenint valors per sobre del 90% [8].

5. Cogeneració en HT-PEMFC

Com s'ha vist, un dels grans avantatges de l'ús de piles PEM d'alta temperatura és la possibilitat d'aplicar un sistema de cogeneració. Els sistemes de cogeneració basats en piles de combustible són sistemes molt prometedors de cara a assolir mètodes energètics més sostenibles. Països com Japó o Corea del sud són capdavaners en la implementació d'aquests sistemes, i els països de zones més occidentals s'han plantejat objectius d'implementació de cara als propers anys [8].

Aquests es basen en la utilització de la potència residual calorífica que es produeix com a producte de la generació d'altres tipus d'energia, en aquest cas d'energia elèctrica. Mitjançant un bon sistema de cogeneració, basat principalment en un sistema de refrigeració que sigui capaç posteriorment d'utilitzar la potència calorífica extreta, es pot arribar a doblar el rendiment de la pila sense cogeneració, assolint valors per sobre del 90%.

Per tal de fer-ho, cal conèixer primer la teoria de la generació de les potències elèctrica i calorífica, per poder dissenyar posteriorment un sistema que sigui capaç d'extreure aquestes potències i aprofitar-les. En aquest apartat es realitza aquest estudi en dos parts, una dedicada a la generació de potència elèctrica i una altra a la calorífica.

5.1. Generació de potència elèctrica

En primera instància, cal estudiar la generació de la potència elèctrica, ja que aquesta és la que en la majoria de casos és l'energia que es pretén obtenir i també degut que la generació de potència calorífica es considera com una conseqüència de les pèrdues en la generació d'aquesta potència elèctrica.

Com s'ha vist en l'apartat anterior, de la reacció d'oxidació de l'hidrogen s'obtenen com a productes dos protons i dos electrons, i són aquests electrons que en circular de l'ànode al càtode generen la potència elèctrica que l'usuari pot utilitzar per al sistema que necessiti alimentar.

Aquesta generació elèctrica es basa en la velocitat de reacció de les dues reaccions (determinada pel valor de la k_i de cada reacció), que en operar amb la concentració superficial dels reactants dóna el flux de reactant que reacciona. La densitat de corrent generada per la reacció és proporcional a aquest valor, i s'obté amb un factor que correspon al nombre de Faraday i el nombre d'electrons transferits.

La diferència entre la densitat de corrent generada per la reacció d'oxidació de l'hidrogen i la consumida per la reacció de reducció de l'oxigen és la densitat de corrent neta que el sistema genera [4] (Eq. 5.1).

$$j = n \cdot F (k_{ox} \cdot C_{H_2} - k_{red} \cdot C_{O_2}) \quad \text{Eq. 5.1}$$

Aquest valor, però, està condicionat per diversos factors com per exemple la temperatura o la superfície activa del catalitzador, i es poden obtenir equacions més explícites que tinguin en compte més variables.

Pel que fa al potencial de la cel·la, en l'apartat anterior s'ha mostrat l'equació per calcular el potencial ideal d'aquesta (Eq. 4.6), que multiplicat pel nombre de cel·les que conformen una pila equival al potencial total de la pila. Però de cara a estudiar un cas real, cal tenir en compte diferents factors que fan que el valor del potencial s'allunyi del valor ideal.

Aquests factors que generen pèrdues són majoritàriament quatre, tenint en compte que el primer és el potencial que es perd en comparació amb l'ideal degut a les diferents condicions de temperatura, pressió i concentracions, i els altres corresponen a les pèrdues per l'activació de la polarització (les majoritàries), les pèrdues òhmiques i les pèrdues per la concentració de la polarització. Si s'extreuen aquestes pèrdues del potencial ideal, s'obté el potencial real de la pila [4].

Si aquesta acció es realitza per diferents valors de densitat de corrent, s'obté una corba de polarització potencial-densitat de corrent, que expressa els valors de potencial real a diferents densitats de corrent (Fig. 5.1).

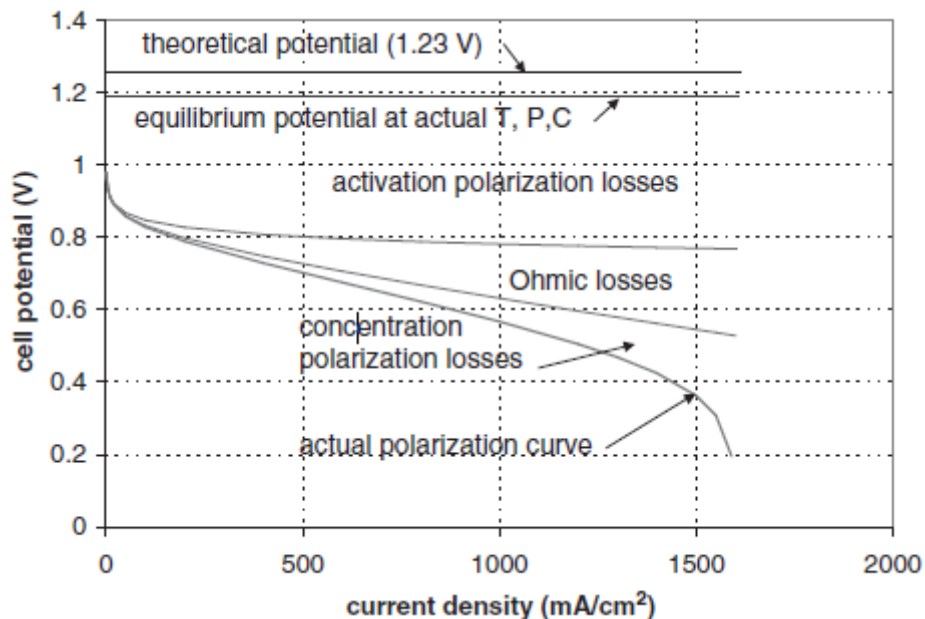


Fig. 5.1. Exemple de corba de polarització potencial-densitat de corrent amb els diferents tipus de pèrdues desglossats [4].

Les pèrdues per activació de la polarització són les que es donen degut a la necessitat d'un sobrepotencial per iniciar la reacció, i el seu valor està majoritàriament relacionat amb la cinètica dels elèctrodes.

D'altra banda, les pèrdues òhmiques es deuen a la resistència que oposen els materials de conducció elèctrica sobre el flux d'electrons i de la membrana sobre el flux de protons. Mentre que les primeres són majoritàriament negligibles, les segones són les més determinants, i depenen del material que conforma la membrana, juntament amb altres factors com per exemple la presència d'aigua [4].

Per últim, les pèrdues degudes a la concentració de la polarització, que es produeixen quan es generen gradients de concentració al llarg de la capa de difusió de gasos degut que un reactiu es consumeix ràpidament per la reacció química que li correspon. Aquestes estan relacionades amb la capacitat de difusió d'aquesta capa, que ha de ser més elevada que la velocitat de reacció per poder abastir la reacció amb els reactius [4].

Tenint en compte totes aquestes pèrdues, es pot determinar quina és l'eficiència elèctrica de la pila, que correspon a la relació entre el voltatge generat i el voltatge ideal d'una pila PEM d'alta temperatura que s'ha determinat en el capítol 4.2.1.

$$\eta = \frac{V}{1,254} \quad \text{Eq. 5.2}$$

5.2. Generació de potència calorífica

Com ja s'ha mencionat en capítols anteriors, de la reacció global de la pila PEM d'alta temperatura s'obtenen com a productes aigua i energia en forma de calor. Un sistema de cogeneració es basa en una bona extracció d'aquesta calor per una posterior utilització per part de l'usuari.

Cal conèixer el valor corresponent a aquesta potència calorífica per dissenyar un sistema que estigui dimensionat per poder extreure la quantitat en concret. La potència calorífica generada està molt relacionada amb l'apartat anterior, en què s'han mostrat unes pèrdues per diferents factors. Aquestes, sumades a les pèrdues irreversibles degudes a la formació d'entropia, conformen totes les pèrdues del sistema.

Les pèrdues irreversibles corresponen a un percentatge de l'energia disponible en l'hidrogen que en cap cas es poden convertir en potència elèctrica, mentre que la resta es trobaran en més o menys quantitat en funció de cada pila i el seu disseny. Però de cara a l'obtenció de potència calorífica, totes aquestes pèrdues conformen un sol bloc, i és que tota la potència disponible que no es transforma en elèctrica, ho fa en potència calorífica.

Per aquest fet, la potència calorífica generada correspon al valor obtingut de restar la potència elèctrica generada a la potència total disponible en el combustible (Eq. 5.3).

$$P_c = P_{disp} - P_e \quad \text{Eq. 5.3}$$

$$P_{disp} = I \cdot N_c \cdot 1,254 \quad \text{Eq. 5.4}$$

$$P_e = I \cdot V \quad \text{Eq. 5.5}$$

Substituint Eq. 5.4 i Eq. 5.5 en Eq. 5.3:

$$P_c = I \cdot N_c \cdot (1.254 - V) \quad \text{Eq. 5.6}$$

Amb aquesta equació es pot determinar el valor de la potència calorífica generada per una pila PEM d'alta temperatura i, a partir d'aquí, dissenyar el sistema de cogeneració que més s'adeqüi al sistema en particular.

En les piles PEM d'alta temperatura, la refrigeració més emprada correspon a un sistema format per plats de refrigeració, que es situen entre cel·les adjacents, separant-les en conjunts de cel·les amb un nombre d'aquestes que cal determinar per cada cas. Per l'àrea corresponent a aquests plats circula el refrigerant, que pot trobar-se en estat líquid o gas, i que cal escollir per obtenir el millor funcionament.

Finalment, cal dissenyar tot un sistema per la utilització d'aquesta calor, ja sigui utilitzant el propi refrigerant o amb un intercanviador de calor intermedi. Aquest sistema pot correspondre a un sistema de calefacció d'un habitatge, com és el cas d'aquest projecte, però també a d'altres sistemes, com per exemple l'obtenció d'aigua calenta d'ús domèstic o d'ús sanitari.

6. Cas d'estudi

En aquest projecte es vol dissenyar i modelar un sistema de microcogeneració que té com a generador una pila PEM d'alta temperatura, per tal de subministrar a un habitatge unifamiliar potència elèctrica per l'ús quotidià i aigua calenta per al sistema de calefacció.

En aquest cas, es decideix que el sistema arrenca quan l'usuari desitja posar en marxa el sistema de calefacció, per donar la calor necessària per tal que l'habitatge arribi a la temperatura requerida, i a més una quantitat de potència elèctrica que es pot utilitzar en el mateix habitatge. Si la quantitat d'energia elèctrica generada no coincideix amb la requerida, s'agafarà o injectarà potència a la xarxa elèctrica. Si no es necessita energia per a la calefacció, el sistema de pila de combustible no s'engega. Dins del sistema de cogeneració es distingeixen diferents parts, els paràmetres de les quals es defineixen en aquest apartat ajustant-se a un sistema realista.

El sistema de calefacció complet consisteix en una pila com a sistema generador i un circuit d'aigua encarregat de refrigerar-la, un circuit d'aigua de calefacció amb un sistema de radiadors i un intercanviador intermedi per transferir la potència d'un sistema d'aigua a l'altre. És important disposar de dos sistemes per tal de poder treballar amb pressions i cabals diferents per poder satisfer les demandes d'ambdós intercanvis. D'altra banda, el sistema no compta amb cap dipòsit, de manera que cal que tota l'energia generada es transfereixi a l'habitatge per evitar un sobreescalfament del sistema.

6.1. Descripció i demanda de calor de l'habitatge

L'habitatge en el qual es vol implementar el sistema està ubicat a la part alta de la ciutat de Barcelona. Aquest consisteix en una casa unifamiliar de dues plantes amb unes golfes i un garatge subterrani habitables.

La casa es divideix en 11 sales, les quals corresponen a un rebedor, menjador/sala d'estar, un lavabo i una cuina a la planta baixa, i un passadís, 3 habitacions i un lavabo a la planta alta, a més dels ja mencionats garatge subterrani i golfes. Es vol que el sistema de calefacció arribi a totes les sales de l'habitatge amb, com a mínim, un radiador. L'habitatge té una superfície habitable de 120 m², i una alçada mitjana per planta de 3 metres.

La pila d'alta temperatura, el seu sistema refrigerant i l'intercanviador de calor líquid-líquid s'ubiquen al garatge subterrani, i l'aigua calenta es fa arribar als radiadors mitjançant un sistema de bombeig que consumeix part de la potència elèctrica generada per la pila.

Per a tenir una primera idea del dimensionament dels diferents elements del sistema de calefacció cal considerar que la demanda de potència calorífica de l'habitatge depèn de la

diferència de temperatures entre l'interior i l'exterior d'aquest. La temperatura interior final un cop el sistema ha fet el seu efecte es considera sempre 294K, ja que és la temperatura a la qual els experts recomanen situar els sistemes de climatització si se'n vol fer un us responsable.

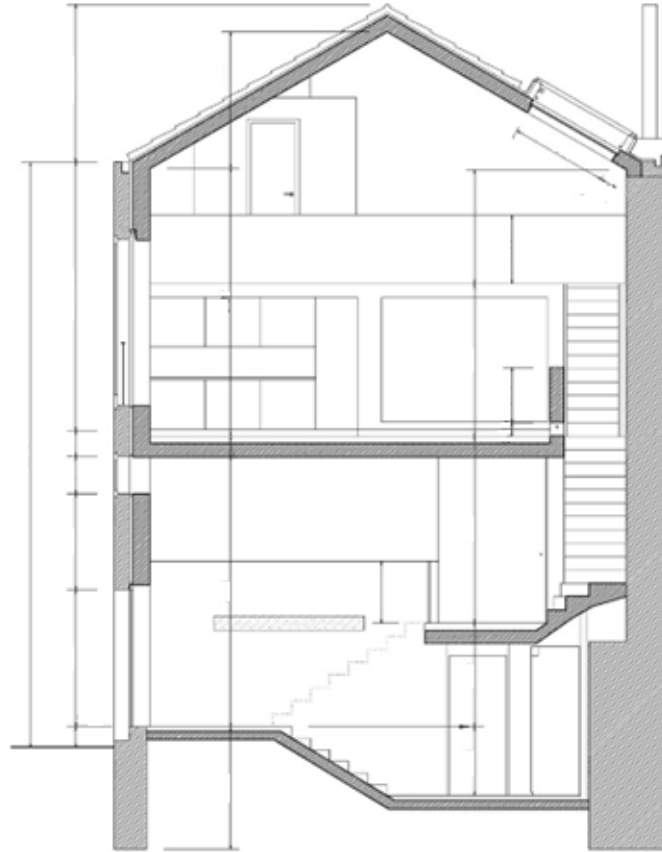


Fig. 6.1. Secció vertical de l'habitatge [42].

Així doncs, per determinar aquesta demanda, cal calcular quina és la potència calorífica que l'habitatge emet cap a l'exterior, i assumir que el sistema de calefacció ha de subministrar a l'edifici aquesta mateixa quantitat per tal de mantenir la temperatura constant.

$$P_{per} = G_{per} \cdot V_{hab} \cdot (T_{hab} - T_{\infty}) \quad \text{Eq. 6.1}$$

Com es veu en Eq. 6.1, per realitzar aquest càlcul cal conèixer el valor del coeficient volumètric de pèrdues tèrmiques de l'edifici G_{per} , el qual fa referència a les pèrdues calorífiques tant per les parets de l'edifici com per les renovacions d'aire. Per obtenir el valor d'aquest coeficient, cal conèixer els coeficients corresponents a ambdós tipus de pèrdues (G_1 i G_2) [9].

El valor de G_1 depèn de la qualitat de l'aïllament de les parets de l'edifici. Aquesta qualitat depèn majoritàriament del material de les parets, del gruix d'aquestes i de la forma de l'edifici. Com que no es vol entrar a dissenyar tant estrictament l'edifici, s'agafa el valor de

G_1 que correspon a un edifici mitjanament aïllat en la (Taula 6.1).

Tipus d'aïllament	$G_1 [W \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}]$
Molt aïllat	<1
Aïllat	1-1,5
Mitjanament aïllat	1,5-2,5
Mal aïllat	2,5-3
No aïllat	>3

Taula 6.1. Coeficient de pèrdues calorífiques a través de les parets de l'edifici en funció del tipus d'aïllament [9].

Pel que fa al valor de G_2 , aquest depèn de les renovacions d'aire que es realitzin entre l'interior i l'exterior de l'edifici i de la temperatura de l'aire en qüestió. Aquest coeficient es regeix segons la següent expressió:

$$G_2 = n_a \cdot C_{p_{aire}} \quad \text{Eq. 6.2}$$

L'efecte de la temperatura de l'aire en les pèrdues per ventilació queda dins la seva relació amb la calor específica de l'aire, com es mostra en la Taula 6.2.

Temperatura (K)	263	273	283	293	303	313
$C_{p_{aire}} (W \cdot h \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	0,375	0,36	0,35	0,34	0,325	0,315

Taula 6.2. Calor específica de l'aire en funció de la temperatura [9].

El valor de n_a és diferent per cada habitació i depèn dels costums que es donen dins l'edifici. En l'habitatge del projecte es considera que els costums s'atenen a les recomanacions marcades per cada tipus de sala .

Tipus d'habitació	$n (h^{-1})$
Habitació	0,5-1
Sala d'estar / Menjador	3-5
Cuina	5-10
Lavabo	5-15

Taula 6.3. Recomanacions de valors de renovació d'aire segons el tipus de recinte [9].

Per calcular el valor de n_a de l'habitatge, cal calcular el valor mitjà entre les 11 sales que s'han mencionat anteriorment. Si es compten els dos rebedors (el passadís es compta com a rebedor), les golfes i el soterrani com a sales d'estar, i s'agafa per cada tipus de sala el valor mitjà, s'obté un valor de n_a de l'habitatge igual a 4,7 (h^{-1}). Substituint aquest valor en Eq. 6.2, i agafant com a capacitat calorífica de l'aire la corresponent a 284 K (la

temperatura mitjana al gener a Barcelona), s'obté un valor de G_2 de $1,65 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$.

Coneixent els dos valors G_1 i G_2 , es calcula G_{per} com la suma d'aquests dos:

$$G_{per} = G_1 + G_2 = 2 + 1,65 = 3,65 \text{ W/K} \cdot \text{m}^3 \quad \text{Eq. 6.3}$$

Un cop es té el coeficient de pèrdues, ja es pot introduir en l'Eq. 6.1 per calcular les pèrdues. Cal introduir també el volum de l'habitatge que, segons les dimensions que s'han mencionat abans, és de 360 m^3 . Finalment, cal determinar un increment de temperatures entre l'interior i l'exterior.

Com que aquest increment no serà un valor constant en la situació real, s'ha de determinar un valor nominal que s'ajusti al màxim a la situació més freqüent. Per aquest fet, el valor de la temperatura de l'habitatge s'ha de suposar que és el valor estacionari, ja que sera el valor més freqüent, i en la majoria dels casos aquest ha de correspondre a 294 K .

Pel que fa al valor de la temperatura exterior, s'escull el valor mitjà històric dels tres mesos més freds de l'any, que correspon a uns 284 K [10]. Amb els valors escollits, la diferència de temperatures entre l'interior i l'exterior és de 10 K .

Introduint els tres valors determinats en l'Eq. 6.1 es determina el valor de les pèrdues calorífiques de l'habitatge en el cas de temperatures nominals:

$$P_{per} = 3,65 \cdot 360 \cdot 10 = 13.140 \text{ W}$$

D'altra banda, el sistema de calefacció no s'ha de dimensionar per poder assolir la temperatura desitjada només en el cas nominal, sinó que cal que aquest sigui capaç de funcionar correctament com a mínim quan a l'exterior es donen les temperatures mínimes mensuals mitjanes.

En aquests casos, la temperatura interior de l'habitatge no varia respecte el cas nominal, mentre que l'exterior ara correspon a la mínima mitjana del mes de gener, que és el mes fred. Aquesta temperatura correspon aproximadament a 279 K [10], i dona un increment de temperatures de 15 K . Utilitzant la mateixa Eq. 6.1, es calculen unes pèrdues en el cas extrem de 19.710 W .

6.2. Predisseny del sistema de generació d'energia (HT-PEMFC)

Un cop s'ha definit la demanda de potència calorífica de l'edifici, cal dimensionar la pila PEM d'alta temperatura per tal que pugui satisfer aquesta demanda. En aquest projecte es modela el funcionament de la pila emprant la corba de polarització (corba voltatge-

densitat de corrent) d'una pila PEM d'alta temperatura de l'Institut de Robòtica i Informàtica Industrial de la Universitat Politècnica de Catalunya [11].

La corba voltatge-densitat de corrent utilitzada correspon a una pila de 12 cel·les amb una àrea activa de 50 cm^2 . D'entre les recomanacions del fabricant de la pila, la més rellevant és la referent a la temperatura màxima d'operació, que s'estima sobre uns 453 K. Per sobre d'aquesta temperatura es podria començar a degradar o a tenir un funcionament menys òptim. En canvi, no es fa cap referència a la densitat de corrent de treball recomanada, fet que indica que es pot treballar dins el rang present en la Fig. 6.2.

Degut que la potència requerida és considerablement superior a la que s'obtingria amb aquesta pila per una densitat de corrent mitjana, és necessari augmentar el nombre de cel·les respecte la pila del catàleg. Per evitar tenir una pila amb un nombre de cel·les molt elevat, també es creu necessari augmentar l'àrea activa a 400 cm^2 (corresponent a una pila quadrada de 20 cm de costat), i es considera que la dependència del voltatge amb la densitat de corrent és extrapolable a una pila de dimensions superiors.

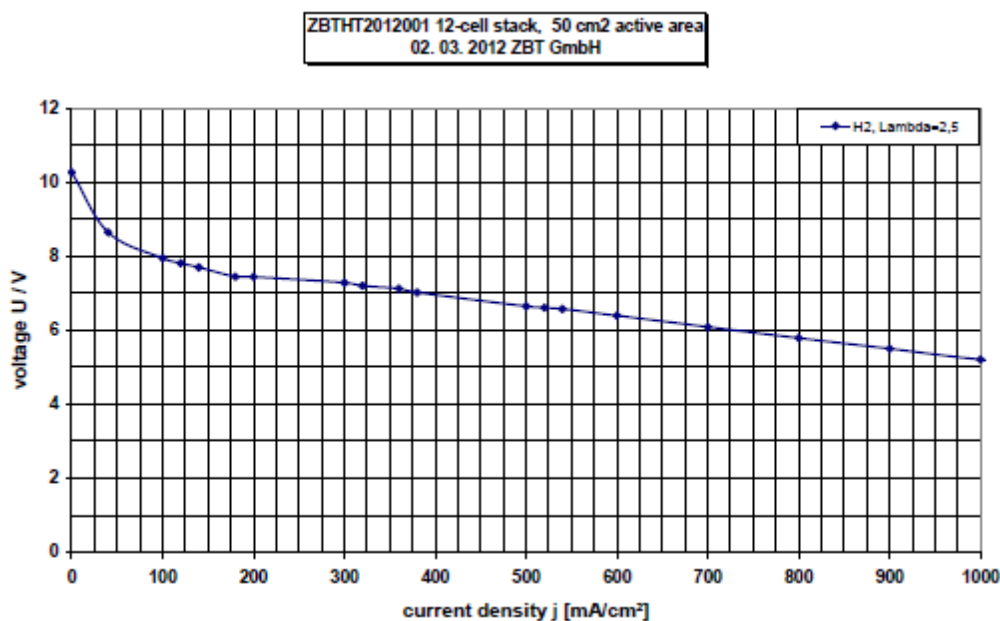


Fig. 6.2. Corba de polarització $V(j)$ de la pila PEM d'alta temperatura de l'IRII [11].

Per tal de dimensionar la pila, primer cal determinar a quina densitat de corrent es desitja treballar. Com que no es disposa de dades del fabricant, es creu convenient determinar si aquesta té un punt on la generació de potència calorífica és màxima respecte a la potència total. Per aquest fet, es representa el valor de la potència calorífica en funció de la densitat de corrent de treball.

Utilitzant l'equació mostrada en l'apartat 5.2 (Eq. 6.4) que permet obtenir la potència calorífica en funció de la intensitat de corrent i del voltatge, es poden determinar els punts de la corba que es desitja representar. Abans, però, cal convertir la corba voltatge-

densitat de corrent a la corba voltatge-corrent per poder calcular la potència, operant amb el valor de l'àrea activa. El terme N_c és igual a 1, per calcular la potència per cel·la unitària.

$$P_c = I \cdot N_c \cdot (1.254 - V) \quad \text{Eq. 6.4}$$

Observant la corba obtinguda (Fig. 6.3) es pot assegurar que no hi ha un punt de màxima producció de potència calorífica, sinó que aquesta augmenta directament amb l'augment de la densitat de corrent. Per aquest motiu, cal utilitzar un altre criteri de cara a determinar la densitat de corrent de treball nominal.

Com que es creu que hi haurà situacions en què la pila treballarà força allunyada del punt nominal, es vol assegurar que en aquests punts la densitat de corrent seguirà dins el rang del qual es disposen dades. Per això, es creu convenient situar el punt nominal de funcionament en una densitat de corrent mitjana, que en aquest cas és de 500 mA/cm².

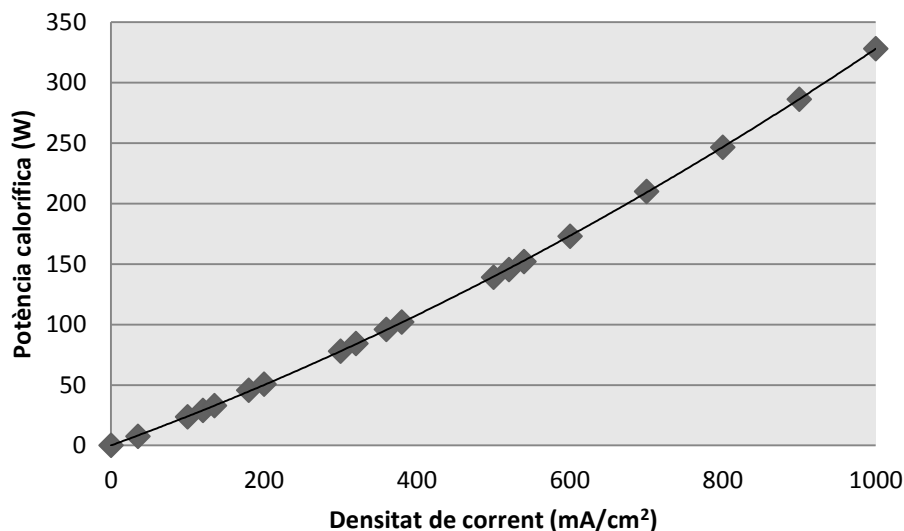


Fig. 6.3. Representació de la potència calorífica generada en funció de la densitat de corrent per cel·la unitària

Per aquest valor de densitat de corrent, i amb una àrea activa de 400 cm², la intensitat de corrent en el punt de funcionament nominal de la pila és de 200 A, i el voltatge per cel·la és aproximadament de 0,56V. Disposant d'aquests valors i del valor de la potència calorífica requerida en condicions nominals (284 K a l'exterior), es pot determinar el nombre de cel·les necessàries per satisfer aquesta demanda aïllant N_c en l'Eq. 6.4.

$$N_c = \frac{P_c}{I \cdot (1.254 - V)} = \frac{13.140}{200 \cdot (1.254 - 0,56)} = 94,66 \approx 95 \text{ cel} \cdot \text{les} \quad \text{Eq. 6.5}$$

Tenint en compte el nombre de cel·les i l'àrea activa de la pila, es determina, comparant amb altres piles PEM d'alta temperatura de la bibliografia [12], la massa d'aquesta, que

és de 50 Kg. Aquest valor és de gran importància, no només per ser una característica física, sinó també perquè serà un paràmetre influent en el sistema de refrigeració.

En tota la parametrització de la pila s'ha decidit no afegir cap factor de pèrdues, ja que no es disposa de bibliografia que determini quin és exactament aquest percentatge de potència calorífica que no es pot aprofitar. De totes maneres, si que s'ha raonat que la majoria d'aquestes pèrdues són de convecció lliure amb l'exterior i que per tant, també contribuirien immediatament a augmentar la temperatura de l'habitatge, ja que s'ha determinat en diferents estudis que la potència que es transfereix als fluxos de reactius és una part molt petita d'aquestes pèrdues [13].

6.3. Predisseny del sistema refrigerant de la pila HT-PEMFC

Amb els paràmetres de la pila definits, el sistema genera la potència calorífica suficient per complir amb la demanda de l'habitatge. Ara cal fer arribar aquesta potència de la pila fins al sistema de calefacció. El primer pas d'aquest camí és l'extracció d'aquesta potència de la pila, i el sistema encarregat de realitzar-lo és el sistema de refrigeració de la pila.

Una bona refrigeració és essencial no només per aprofitar el màxim de potència i per tant elevar el rendiment del sistema, sinó que també per mantenir una temperatura adequada a la pila que sigui òptima per al funcionament i la baixa degradació dels materials.

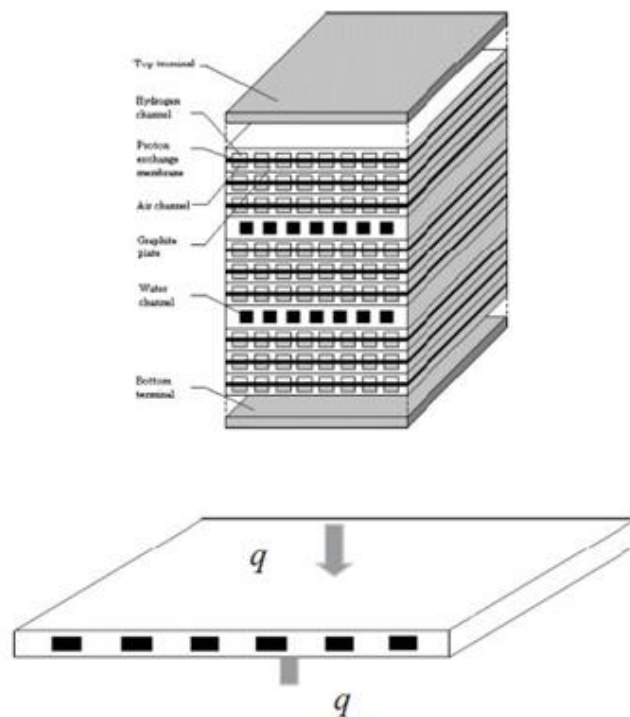


Fig. 6.4. Esquemàtic d'una pila PEM i el seu plat de refrigeració [14].

En aquest projecte, es decideix no elaborar un model de la distribució de les temperatures en diferents punts de l'interior de la pila, i s'assumeix una temperatura T_{pila} com a única en tots els punts. Tot i així, és cert que aquesta distribució existeix, i per aquest fet s'empren les metodologies de refrigeració amb les quals s'ha determinat que la

temperatura es manté més constant en tota la pila.

En la majoria dels casos, la refrigeració de les piles PEM es du a terme mitjançant una seqüència de plats de refrigeració, que es van intercalant dins el sistema. Així, cada plat és encarregat de refrigerar un nombre de cel·les determinat, que es defineix segons el nombre de cel·les que hi ha entre dos plats consecutius [14].

La refrigeració es pot realitzar tant amb gasos (aire) com amb líquids, i cal escollir el fluid més adient per a cada sistema. El fluid més comú per les piles de més de 5 kW (com en el cas d'aquest projecte) és l'aigua degut a la seva capacitat calorífica alta, i per tant és l'escollit en aquest cas. A les temperatures en què es treballa, cal tenir en compte que

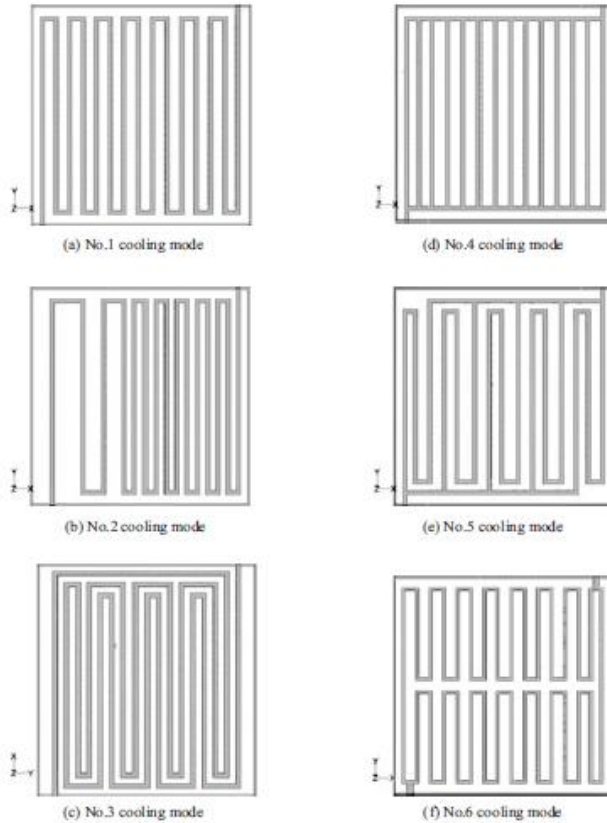


Fig. 6.5. Estructura del canal d'aigua refrigerant en una pila PEM; (a), (b) i (c) són canals de tipus serpentin; (d), (e) i (f) són canals de tipus paral·lel [14].

l'aigua sofreix un canvi de fase i que s'haurà de treballar a més pressió per tal que el canvi de fase no es produeixi

L'aigua refrigerant entra al plat i en recorre tota la superfície a través d'un canal que pot ser de tipus serpentin o paral·lel, el qual cobreix tota l'àrea activa de les cel·les que l'envolten i obté la potència calorífica que aquestes generen. La forma del circuit que recorre el líquid és determinant en la distribució de temperatures al llarg de la pila, obtenint gradients més alts o més baixos segons el que s'empri.

D'entre totes les estructures de canal que es poden observar en la Fig. 6.5, les de tipus serpentin són les que assoleixen una temperatura més constant al llarg de tota l'àrea [14][15]. En concret, el mètode de refrigeració número 3 (Fig. 6.5c) és el que té un índex de temperatura uniforme més alt com s'observa en la Taula 6.4 i en la Fig 6.6. Seleccionar aquesta forma del canal de refrigeració permet justificar la falta d'un model de distribució de temperatures

A més, els canals de tipus serpentin requereixen sempre cabals de refrigerant més baixos, fet que fa disminuir les pèrdues de càrrega en la refrigeració i, per tant, augmentar més l'eficiència del sistema [16].

Mètode de refrigeració	Índex de temperatura uniforme (K)
1	2,8
2	2,0
3	1,1
4	5,1
5	2,9
6	1,7

Taula 6.4. Índex de temperatura uniforme al llarg de l'àrea activa per diferents mètodes de refrigeració [14].

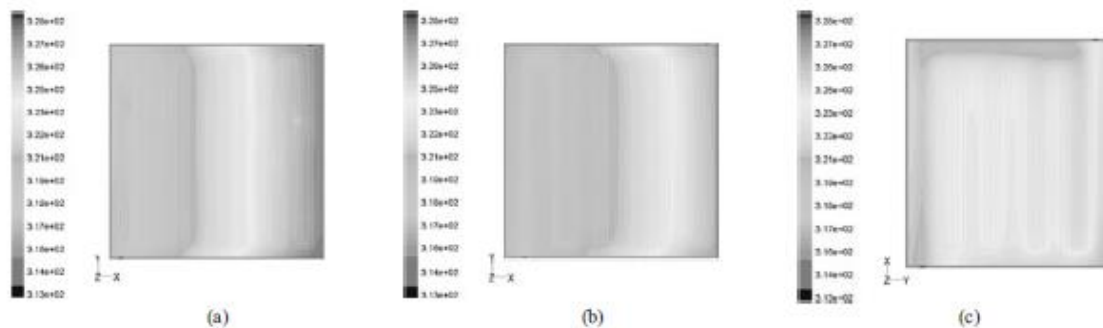


Fig 6.6. Perfil de temperatures en la superfície d'una cel·la pels tres mètodes de refrigeració de tipus serpentin; (a), (b) i (c) corresponen als mètodes 1, 2 i 3 respectivament [14].

Però per poder assumir una temperatura única en tota la pila, cal disposar del nombre de plats necessaris per tal que la diferència de temperatures entre les cel·les adjacents als plats de refrigeració i les cel·les interiors sigui la mínima possible.

Segons s'ha pogut observar en diferents referències bibliogràfiques, la freqüència de disposició de plats de refrigeració oscil·la entre 3 i 6 cel·les per plat de refrigeració [14][17]. Tenint aquest fet en compte, es determinarà el nombre de plats amb l'ajuda del model, escollint el valor que doni els resultats més bons. Aquest valor, a més, tindrà un efecte immediat en el cabal de refrigerant necessari, el qual es calcularà per tots els casos possibles.

Per determinar l'efecte que té el nombre de plats, caldrà calcular l'àrea de refrigeració de la qual es disposarà per cada possible valor. Per aquest càlcul, s'assumeix que l'àrea d'intercanvi d'un plat és igual a tota l'àrea activa d'una cel·la, i com que l'intercanvi es realitza tant per la part superior com per la part inferior del plat, cadascun disposa d'una àrea d'intercanvi igual a dues vegades l'àrea activa d'una cel·la (excepte en el cas dels extrems, on per simplificar es compta cada plat com a mig).

$$A_r = N_p \cdot 2 \cdot A \quad \text{Eq. 6.6}$$

Finalment, per acabar de parametritzar el sistema de refrigeració, cal determinar el valor de la calor específica de l'aigua C_{pw} , que és igual a $4,18 \cdot 10^6 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$, de la capacitat calorífica de la pila C_{pila} , que segons la bibliografia és igual a $691 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ [14], i del coeficient global de transferència de calor U , que segons la bibliografia equival a $622,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [14]. A més, com bé s'ha dit, cal treballar a pressions superiors a l'atmosfèrica per disposar d'aigua en estat líquid. En aquest cas, la pressió de treball és de 5 atm.

Amb aquests valors queda parametritzat el sistema de refrigeració de la pila PEM (excepte el nombre de plats, que es determinarà amb l'ajuda del model). Ara cal transferir la potència generada ara cal transferir-la de l'aigua emprada com a refrigerant a l'aigua del sistema de calefacció.

6.4. Predisseny de l'intercanviador de calor líquid-líquid

Per poder emprar la potència calorífica en el sistema de calefacció, cal disposar d'ella en unes condicions concretes. És per això que es transfereix de l'aigua de refrigeració de la pila, que té uns paràmetres determinats per optimitzar aquesta refrigeració (pressió, cabal...), a l'aigua de calefacció, els paràmetres de la qual estan dissenyats per tenir un funcionament de rendiment màxim.

Aquest intercanvi de calor es produeix mitjançant un intercanviador de tubs concèntrics, treballant amb dos fluids a contra-corrent, on l'aigua de refrigeració, que és la més calenta, circula pel tub interior, i l'aigua de calefacció per l'exterior.

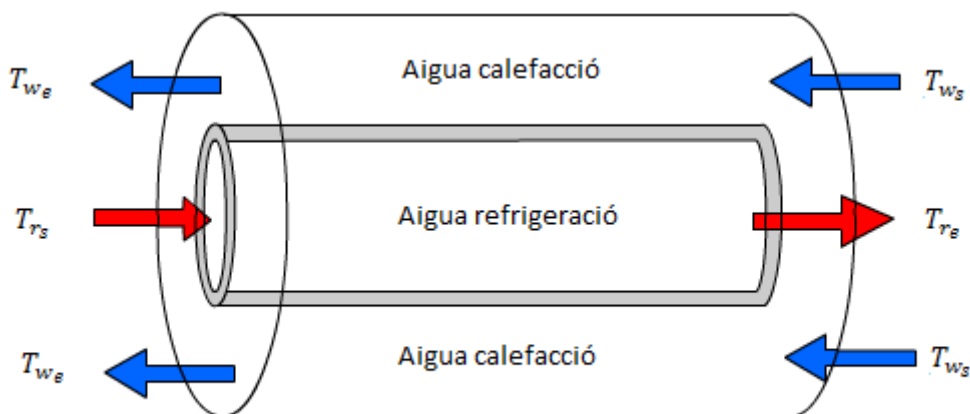


Fig. 6.7. Esquema de l'intercanviador de tubs concèntrics [18].

Cal dimensionar l'intercanviador perquè s'ajusti als fluxos d'aigua que el travessen. Per les condicions dels fluids, cal que l'intercanviador estigui preparat per treballar amb un fluid a una pressió de 5 atm i l'altre a 6 atm, ja que és la pressió de calefacció. A més, com s'explicarà en el següent apartat, cal que el fluid d'aigua de calefacció tingui un increment de temperatura d'uns 20 graus en operació nominal.

Els paràmetres que cal determinar per definir l'intercanviador i poder realitzar els càlculs de l'intercanvi són quatre: el coeficient global de transferència de calor (U_{int}), els diàmetres dels dos tubs i la longitud de l'intercanviador. El primer es pot determinar mitjançant un seguit d'equacions que tenen en compte factors com el material emprat, els diàmetres dels tubs o les resistències d'embrutiment entre d'altres [18], però degut a la quantitat de bibliografia de la qual es disposa sobre intercanviadors semblants amb els mateixos fluids, es decideix emprar un valor mitjà dels de la bibliografia, el qual correspon a $1150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ [19].

Pel que fa als diàmetres, cal que s'ajustin als cabals d'aigua, (v_i) ja que la relació entre aquests dos factors determina la velocitat dels fluids (v_i) (Eq. 6.7), paràmetre que cal mantenir dins uns rangs per al bon funcionament del sistema. En aquest punt, no es coneix cap dels dos cabals, ja que el de refrigerant es determinarà emprant el model quan es conegui el nombre de plats refrigerants, i el d'aigua de calefacció quan es dissenyi el sistema de calefacció.

$$v'_r = \frac{\tau \cdot d_r^2}{4} \cdot v_r \quad \text{Eq. 6.7}$$

Tot i així, es pot fer una estimació de l'ordre de magnitud que aquests tindran, i determinar així uns diàmetres que després poden ser variats lleugerament en cas que les velocitats es desajustin dels rangs recomanats. Per aquest motiu, s'estima que el cabal d'aigua refrigerant tindrà un ordre que anirà entre 10^{-4} i $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, i que el d'aigua de calefacció estarà al voltant dels $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Així doncs, cal determinar el rang de velocitats adequat per cada fluid. En el cas de l'aigua refrigerant, el rang s'obté de la bibliografia, i es situa entre 10^{-2} i $10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [20], velocitats entre les quals s'obtenen els millors resultats en quant a mantenir una temperatura constant al llarg de la superfície de la pila. Utilitzant un valor mitjà d'aquest rang i del rang de cabals, es pot determinar el valor del diàmetre substituïnt en Eq. 6.8, que arrodonint correspon a 0,1 m.

$$d_r = \sqrt{\frac{4 \cdot v'_r}{\tau \cdot v_r}} \quad \text{Eq. 6.8}$$

Quant a l'aigua de calefacció, el rang es regeix per les recomanacions de velocitats de fluids en canonades metàl·liques, el qual les restringeix a un interval entre $0,5$ i $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [21]. En aquest cas, s'escull una velocitat igual a $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ per obtenir un diàmetre el màxim de gran, però ja que aquest fluid és el que circula pel tub exterior, cal obtenir el diàmetre d'aquest tenint en compte que ha de contenir l'interior i també el gruix de paret.

Per aquest fet, cal consultar el valor estàndard de gruix de paret per a una canonada de

diàmetre 0,1 m, i es determina que aquest gruix ha de ser d'aproximadament 0,5 cm [22]. Amb aquest valor, el diàmetre exterior del tub interior és de 0,11 m. Modificant l'Eq. 6.7 per tal que s'adeqüi a dos tubs concèntrics, s'obté l'Eq. 6.9.

$$v'_w = \frac{\tau \cdot (d_w^2 - 0,11^2)}{4} \cdot v_w \quad \text{Eq. 6.9}$$

Nom.	O.D. Inches	PIPE SCHEDULES															
		WALL THICKNESS (Inches)															
		5s	5	10s	10	20	30	40s & Std	40	60	80s & E.H.	80	100	120	140	160	Dbl. E.H. (XXH)
1 1/2	1.900	.065	.065	.109	.109			.145	.145		.200	.200				.281	.400
2	2.375	.065	.065	.109	.109			.154	.154		.218	.218				.343	.436
2 1/2	2.875	.083	.083	.120	.120			.203	.203		.276	.276				.375	.552
3	3.500	.083	.083	.120	.120			.216	.216		.300	.300				.437	.600
3 1/2	4.000	.083	.083	.120	.120			.226	.226		.318	.318					.636
4	4.500	.083	.083	.120	.120			.237	.237	.281	.337	.337		.437		.531	.674
4 1/2	5.000							.247			.355						.710

Taula 6.5. Gruixos de paret en funció del diàmetre de la canonada [22].

Substituint valors en Eq. 6.9, s'obté un valor per al diàmetre exterior igual a 0,12 m. Amb aquest, es disposa dels valors dels tres primers paràmetres que cal determinar. El quart, que correspon a la longitud de l'intercanviador, es calcularà, com en el cas d'alguns paràmetres del sistema refrigerant, amb l'ajuda del model.

Els valors dels diàmetres, però, no és el que es necessita per realitzar els càlculs de calor transferida, sinó que cal obtenir el valor d'altres paràmetres a partir d'aquests. Els paràmetres que cal conèixer són l'àrea d'intercanvi i els volums d'ambdós tubs.

Per calcular l'àrea d'intercanvi, cal determinar si aquesta es referencia respecte el líquid interior o el líquid exterior. Aquest fet influirà en el diàmetre utilitzat per calcular-la, que pot ser l'interior o l'exterior del tub intern. En aquest cas, es decideix utilitzar el de l'exterior del tub intern, 0,11 m, i el valor de l'àrea ve donat per la següent expressió, la qual depèn de la longitud que es determini posteriorment:

$$A_{int} = \pi \cdot 0,11 \cdot L \approx 0,35 \cdot L$$

Per calcular els valors dels volums corresponents a la canonada de cadascuna de les aigües, l'equació emprada és la següent, i els resultats també depenen de la longitud de l'intercanviador:

$$V_i = \frac{v'_i}{v_i} \cdot L ; V_r = 0,01 \cdot L ; V_w = 0,0002 \cdot L$$

El fet de variar la longitud tindrà un efecte en aquests tres valors (l'àrea i els dos volums), tenint així una gran incidència en l'intercanvi, sobretot en el cas de l'àrea. Disposant d'aquests tres valors i del coeficient global de transferència de calor, es pot modelar l'intercanvi, i procedir a dissenyar el sistema de calefacció.

6.5. Predisseny del sistema de calefacció domèstic

De cara a modelar el sistema de calefacció, a part dels paràmetres determinats en l'apartat 6.1, com la constant de pèrdues calorífiques o el volum de l'habitatge, cal dimensionar el sistema per tal que pugui complir amb la demanda de potència calorífica que s'ha determinat en el mateix apartat.

Per aquest fet, el nombre de radiadors dels quals disposa l'habitatge ha de ser suficient per aportar els 13.140 W de potència calorífica que es requereixen en l'estat nominal, a més de ser capaços de treballar fora dels valors nominals per aportar més o menys potència en cas que es necessiti.

De cara a determinar aquest nombre de radiadors, s'obtenen les característiques dels radiadors més usats, les quals s'extreuen d'un catàleg del proveïdor de radiadors Baxi [23]. Els radiadors més habitualment utilitzats són els d'alumini, els quals tenen el millor funcionament d'entre la resta de materials, degut a la possibilitat de transferir una alta potència, amb una resposta ràpida i una bona relació radiació-convecció [24].

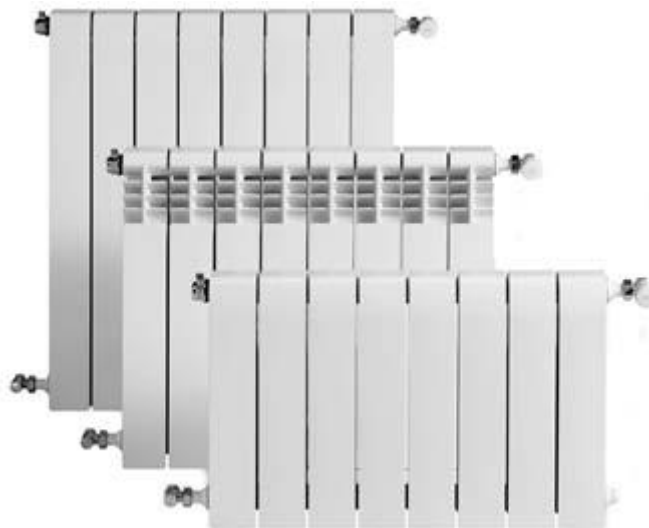


Fig. 6.8. Exemples de radiadors d'alumini [23].

Aquests radiadors consisteixen en l'associació en paral·lel d'elements, que s'acoblen mitjançant maneguets. La pressió a la qual treballen és de 6 atm, és per això que l'aigua

que circula pel circuit de calefacció cal que estigui a aquesta pressió. L'increment de temperatures entre l'aigua de calefacció i la temperatura de l'habitatge pot ser de 40 o 50 graus, aportant calors diferents en funció d'aquesta diferència.

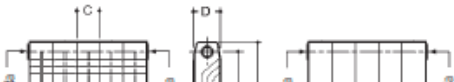
De cara a un màxim aprofitament dels recursos energètics, s'ha determinat que el mètode més sostenible correspon a la calefacció de baixa temperatura, la qual requereix un increment de 40 graus entre les temperatures del radiador i de la casa, i una diferència de temperatures entre l'aigua d'entrada i l'aigua de sortida de 20 graus. Essent la temperatura de l'habitatge d'uns 293 K, la temperatura de l'aigua ha de ser de mitjana igual a 333 K, el que correspon a una temperatura d'entrada de 343 K i una de sortida de 323 K [24].

Amb el dimensionament, es pretén que els resultats de la simulació s'ajustin al màxim a aquests valors, ja que es vol tenir un sistema el més sostenible possible. De cara a dimensionar el sistema, cal conèixer les característiques dels radiadors, les quals es poden observar en la Fig. 6.9. Amb aquestes, es pot determinar mitjançant l'equació característica dels radiadors, la potència calorífica que s'intercanvia en funció de les temperatures de l'aigua.

			30	45	60
Presión trabajo	bar		6	6	6
Temperatura máx. de trabajo	°C		110	110	110
Cotas	Alto (A)	mm	288	421	571
	Entrecentros (B)	mm	218	350	500
	Ancho (C)	mm	80	80	80
	Profundo (D)	mm	147	82	82
Peso	kg		1,45	1,13	1,43
Capacidad de agua	l		0,27	0,29	0,36
Potencia por elemento (1)	Frontal aberturas	$\Delta T = 40^{\circ}$ W	62	68,4	89,4
		$\Delta T = 50^{\circ}$ W	82,9	92,4	120,8
	Frontal plano	$\Delta T = 40^{\circ}$ W	61,5	65,6	85,4
		$\Delta T = 50^{\circ}$ W	82	88,6	115,1
Exponente "n" de la curva característica (1)	Frontal aberturas		1,3	1,35	1,35
	Frontal plano		1,29	1,35	1,34
Forma de suministro	Se expiden en bloques de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 14				
Referencia (2)			194A 1xx01	194A 1xx01	194A 2xx01
Euros / Elemento			19,15	13,35	13,75

(1) $\Delta T = (T_{\text{media radiador}} - T_{\text{ambiente}})$ en °C
Según UNE-EN-442

(2) Accesorios no incluidos.
Digitos xx = Ver tabla "Codificación de radiadores DUBAL".
Ejemplo:
DUBAL 60 de 8 elementos = 194A25801



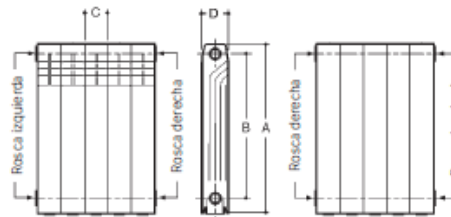


Fig. 6.9. Característiques de tres tipus de radiadors d'alumini [23].

En aquest projecte, s'han escollit com a radiadors els del tercer tipus, en concret els que tenen la part frontal amb obertures. Com es pot observar, l'exponent n per aquests radiadors és igual a 1,35. Per cada element d'aquests radiadors, tenint en compte que, com s'ha dit, l'increment de temperatures és de 40 graus, es transmeten 89,4 W de potència calorífica.

Tenint en compte aquest valor, cal determinar el nombre de radiadors i d'elements per radiador que s'empraran. Usualment, el nombre d'elements per radiador és de l'ordre de 10, i per això es decideix utilitzar aquest valor. De fet, aquest no és massa significatiu, ja que el que realment determina la potència és el nombre d'elements totals en l'habitatge, i no tant de quina forma s'associïn. Coneixent aquest valor, per donar la potència nominal requerida, es determina el nombre de radiadors necessari (Eq. 6.10).

$$P_c = 89,4 \cdot 10 \cdot N_r = 13.140 ; N_r \approx 15 \text{ radiadors} \quad \text{Eq. 6.10}$$

Per acabar de dimensionar el sistema de calefacció cal determinar, també, el cabal d'aigua que circularà per aquest. Degut que es pretén que en el punt nominal, els increments de temperatura en els radiadors siguin els mencionats anteriorment, aquest cabal queda fixat, i es pot deduir de la següent expressió:

$$P_c = v'_w \cdot C_{p_w} \cdot \Delta T_w ; v'_w = \frac{13.140}{4.18 \cdot 10^6 \cdot 20} = 0,00016 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{Eq. 6.11}$$

De cara al model, aquest cabal es pot mantenir constant, i determinar si els canvis en les temperatures s'allunyen molt dels valors desitjats, o es pot controlar perquè aquests increments siguin sempre els adequats per a qualsevol punt de treball. Aquesta discussió es reprendrà al capítol 8.

Per últim, cal determinar una capacitat calorífica de l'habitatge, la qual determina la velocitat amb la qual aquest s'escalfa. Aquest valor correspon a la capacitat calorífica de l'aire, el qual es considera que té una certa humitat, i que correspon a $1600 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ per una humitat del 75%, valor comú a la ciutat de Barcelona. Amb aquest valor, queda totalment dimensionat el sistema de calefacció i també el model integrat.

7. Model dinàmic del sistema

Un cop predissenyat el sistema que s'empraria en un cas real, es procedeix a modelar-lo mitjançant el software Simulink, per poder realitzar una simulació posteriorment. Aquest model es divideix en tres blocs principals. El primer bloc correspon al sistema de generació juntament amb el seu sistema refrigerant, el segon correspon a l'intercanviador de calor entre el líquid refrigerant de la pila i l'aigua de calefacció, i l'últim al sistema de calefacció domèstic. La unió d'aquests tres blocs dóna lloc al model integrat del sistema.

7.1. Model del sistema de generació de potència

Aquest fragment del model és el que correspon a la pila PEM d'alta temperatura i al seu sistema refrigerant. Amb els valors dels paràmetres assignats segons el predisseny realitzat en els apartats 6.2 i 6.3, aquest bloc obté el valor de la potència elèctrica generada, la temperatura de la pila i la temperatura de sortida del líquid refrigerant a partir d'unes entrades que corresponen a la intensitat de corrent de la pila i la temperatura d'entrada i el cabal del líquid refrigerant., tal com s'observa en la Fig. 7.1.

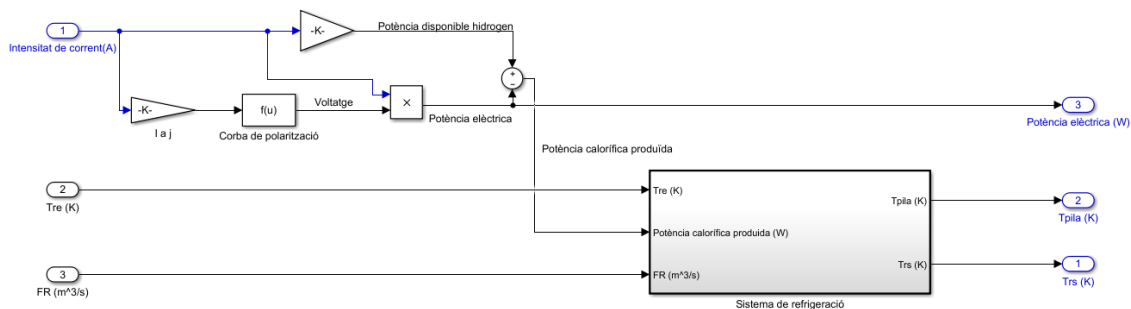


Fig. 7.1. Model del sistema de generació de potència.

Inicialment es calcula la potència elèctrica generada per la pila, com es mostra en la següent equació (Eq. 7.1):

$$P_e = I \cdot V \quad \text{Eq. 7.1}$$

Cal conèixer el valor del voltatge de la pila per poder calcular la potència elèctrica generada. Aquest valor es pot obtenir a partir de la intensitat de corrent, que és coneguda ja que és un input del sistema, i la corba de polarització. Per fer-ho, cal calcular primer la densitat de corrent de la pila (Eq. 7.2). El valor obtingut ha d'estar dins el rang de densitats de corrent de la corba.

$$j = 0.1 \cdot (I/A) \quad \text{Eq. 7.2}$$

Un cop es coneix el valor de la densitat de corrent, cal introduir-lo a l'equació de la corba de polarització de la pila PEM d'alta temperatura de l'IRII (Fig. 7.2), per finalment obtenir el del voltatge (Eq. 7.3). Aquesta corba s'ha ajustat a un polinomi de quart grau, amb uns paràmetres d'ajust bons ($r^2 = 0,97$).

$$V = f(j) \quad \text{Eq. 7.3}$$

Com s'ha mostrat en l'apartat 5.2., a partir del valor de la potència elèctrica es pot calcular la potència calorífica generada per la pila. Aquesta correspon a la diferència entre la potència química disponible de l'hidrogen i la que s'ha convertit en elèctrica, ja que aquesta diferència es manifesta tota en forma de calor (Eq. 7.4).

$$P_c = I \cdot N_c \cdot (1.254 - V) \quad \text{Eq. 7.4}$$

Amb la potència calorífica ja determinada, es passa a modelar el sistema de refrigeració de la pila. A partir del cabal de líquid refrigerant, la temperatura d'entrada d'aquest i el valor de la potència calorífica generada, es poden obtenir les temperatures de la pila i del líquid refrigerant de sortida, mitjançant un balanç d'energia de la pila (Eq. 7.5).

$$P_{\text{entrada}} - P_{\text{sortida}} + P_{\text{generada}} - P_{\text{acumulada}} = 0 \quad \text{Eq. 7.5}$$

Substituint P_{generada} per la potència calorífica, i P_{entrada} menys P_{sortida} per la potència que extreu el líquid refrigerant, s'obté la següent expressió:

$$P_c - P_r - P_{\text{acumulada}} = 0 \quad \text{Eq. 7.6}$$

On:

$$P_r = U \cdot A_r \left(\frac{T_{r_s} - T_{r_e}}{\ln \left(\frac{T_{pila} - T_{r_e}}{T_{pila} - T_{r_s}} \right)} \right) \quad \text{Eq. 7.7}$$

$$P_r = v'_r \cdot C_{p_r} \cdot (T_{r_s} - T_{r_e}) \quad \text{Eq. 7.8}$$

$$P_{\text{acumulada}} = M_{pila} \cdot C_{pila} \frac{dT_{pila}}{dt} \quad \text{Eq. 7.9}$$

Operant amb Eq. 7.8 i Eq. 7.9 es pot trobar una expressió per calcular la temperatura de sortida del líquid refrigerant, que és l'última variable que es desconeix per poder calcular la temperatura de la pila.

$$T_{r_s} = T_{pila} + (T_{r_e} - T_{pila}) \cdot e^{\frac{-U \cdot A_r}{v'_r \cdot C_{p_r}}} \quad \text{Eq. 7.10}$$

Finalment, substituint Eq. 7.4, Eq. 7.7 i Eq. 7.9 en Eq. 7.6, obtenim una equació diferencial (Eq. 7.11) amb la qual es determina la temperatura de la pila, que és el primer

estat del model integrat i l'únic d'aquest bloc.

$$\frac{dT_{pila}}{dt} = \frac{I \cdot N_c \cdot (1.254 - V) - U \cdot A_r \left(\frac{T_{r_s} - T_{r_e}}{\ln \left(\frac{T_{pila} - T_{r_e}}{T_{pila} - T_{r_s}} \right)} \right)}{M_{pila} \cdot C_{pila}} \quad \text{Eq. 7.11}$$

Amb els tres valors de sortida del bloc obtinguts, es pot procedir a modelar els següents blocs, emprant la temperatura del líquid refrigerant com a entrada del bloc de l'intercanviador de calor, i les altres dues sortides com a outputs del model integrat final.

7.2. Model de l'intercanviador de calor líquid-líquid

Un cop modelat el comportament de la pila i l'extracció de la potència calorífica d'aquesta, cal modelar la transferència d'aquesta entre el refrigerant de la pila i l'aigua del sistema de calefacció de l'habitatge. Utilitzant els paràmetres i els principis de funcionament esmentats en l'apartat 6.4, es modela l'intercanviador de tubs concèntrics que realitza aquesta funció.

Aquest model té com a entrades els cabals i les temperatures de sortida del líquid refrigerant (T_{rs}) i de l'aigua (T_{ws}) tant de la pila com de l'habitatge. A partir d'aquestes, obté els valors corresponents a les temperatures d'entrada als dos sistemes d'ambdós líquids.

El bloc es basa en el model de diferències de temperatura amb mitja logarítmica per calcular les temperatures de sortida de dos líquids en un intercanviador de calor [25].



Fig. 7.2. Bloc de l'intercanviador de calor líquid-líquid.

$$\frac{dT_{r_e}}{dt} = \frac{v'_r}{V_r} (T_{r_s} - T_{r_e}) - \frac{U_{int} \cdot A_{int}}{C_{p_r} \cdot V_r} \left(\frac{(T_{r_s} - T_{w_e}) - (T_{r_e} - T_{w_s})}{\ln \left(\frac{T_{r_s} - T_{w_e}}{T_{r_e} - T_{w_s}} \right)} \right) \quad \text{Eq. 7.12}$$

$$\frac{dT_{w_e}}{dt} = \frac{v'_w}{V_w} (T_{w_s} - T_{w_e}) + \frac{U_{int} \cdot A_{int}}{C_{p_w} \cdot V_w} \left(\frac{(T_{r_s} - T_{w_e}) - (T_{r_e} - T_{w_s})}{\ln \left(\frac{T_{r_s} - T_{w_e}}{T_{r_e} - T_{w_s}} \right)} \right) \quad \text{Eq. 7.13}$$

Mitjançant les Eq. 7.12 i Eq. 7.13 es poden obtenir les temperatures d'entrada del refrigerant a la pila (T_{re}) i de l'aigua a l'habitatge (T_{we}), que són dos estats més del model

integrat. El subíndex referent a la posició (entrada o sortida) fa referència a la pila i a l'habitatge, i no es correspon a la posició en aquest intercanviador.

7.3. Model del sistema de calefacció domèstic

L'últim bloc del model és l'encarregat de representar el sistema de calefacció dins l'habitatge en qüestió. Aquest bloc té com a entrades la temperatura d'entrada de l'aigua, el cabal d'aigua i la temperatura de l'exterior. A partir d'aquestes, s'obtenen les temperatures de l'habitatge i de l'aigua de sortida.

Per tal d'obtenir-les, es simplifica el model fent la suposició que l'habitatge es pot considerar una sola habitació amb el volum corresponent a la suma de totes les esmentades anteriorment, i que els radiadors consisteixen en un únic radiador amb els paràmetres corresponents a la suma dels 15 radiadors de 10 elements emprats.

Com en el cas del sistema de generació, es realitza un balanç energètic del sistema de calefacció (Eq. 7.14).

$$P_{entrada} - P_{sortida} + P_{generada} - P_{romanent} = 0 \quad \text{Eq. 7.14}$$

Substituint $P_{sortida}$ per la potència que s'emporta l'aigua de calefacció més la que es perd per les parets de l'habitatge, i $P_{entrada}$ menys la part de $P_{sortida}$ que s'emporta l'aigua de calefacció per la potència que transfereixen els radiadors a l'habitatge (P_{rad}) en Eq. 7.14, s'obté:

$$P_{rad} - P_{per} - P_{acumulada} = 0 \quad \text{Eq. 7.15}$$

On:

$$P_{rad} = Q_n \cdot \left(\frac{\frac{T_{w_e} + T_{w_s}}{2} - T_{hab}}{\Delta T_n} \right)^n \quad \text{Eq. 7.16}$$

$$P_{rad} = v'_w \cdot C_{p_w} \cdot (T_{w_e} - T_{w_s}) \quad \text{Eq. 7.17}$$

$$P_{per} = G_{per} \cdot V_{hab} \cdot (T_{hab} - T_{\infty}) \quad \text{Eq. 7.18}$$

$$P_{acumulada} = V_{hab} \cdot C_{hab} \frac{dT_{hab}}{dt} \quad \text{Eq. 7.19}$$

Per poder calcular el valor de la temperatura de l'habitatge, cal primer calcular la de l'aigua de sortida del sistema. Aquesta es calcula a partir de les equacions Eq. 7.16 [26] i Eq. 7.18.

$$T_{ws} = T_{we} - \frac{Q_n \cdot \left(\frac{T_{we} + T_{ws}}{2} - T_{hab} \right)^n}{v'_w \cdot C_{pw}} \quad \text{Eq. 7.20}$$

Encara que el càlcul d'aquesta utilitza la pròpia temperatura de sortida per calcular una temperatura mitjana de l'aigua, no es creu convenient aplicar una bloc dinàmic en aquest càlcul, i s'aplica en el model directament tal com s'observa en Eq. 7.20, restant a la temperatura d'entrada la calor de radiació dividida per les constants de capacitat i de cabal d'aigua.

Disposant de la temperatura de sortida de l'aigua de calefacció, es poden substituir Eq. 7.16, Eq. 7.17 i Eq. 7.19 en l'Eq. 7.15, obtenint una equació diferencial corresponent a la temperatura de l'habitatge, que és el quart estat del model integrat, i la sortida més important ja que la finalitat d'un sistema de calefacció és incidir en aquesta temperatura.

$$\frac{dT_{hab}}{dt} = \frac{Q_n \cdot \left(\frac{T_{we} + T_{ws}}{2} - T_{hab} \right)^n - G_{per} \cdot V_{hab} \cdot (T_{hab} - T_{\infty})}{V_{hab} \cdot C_{hab}} \quad \text{Eq. 7.21}$$

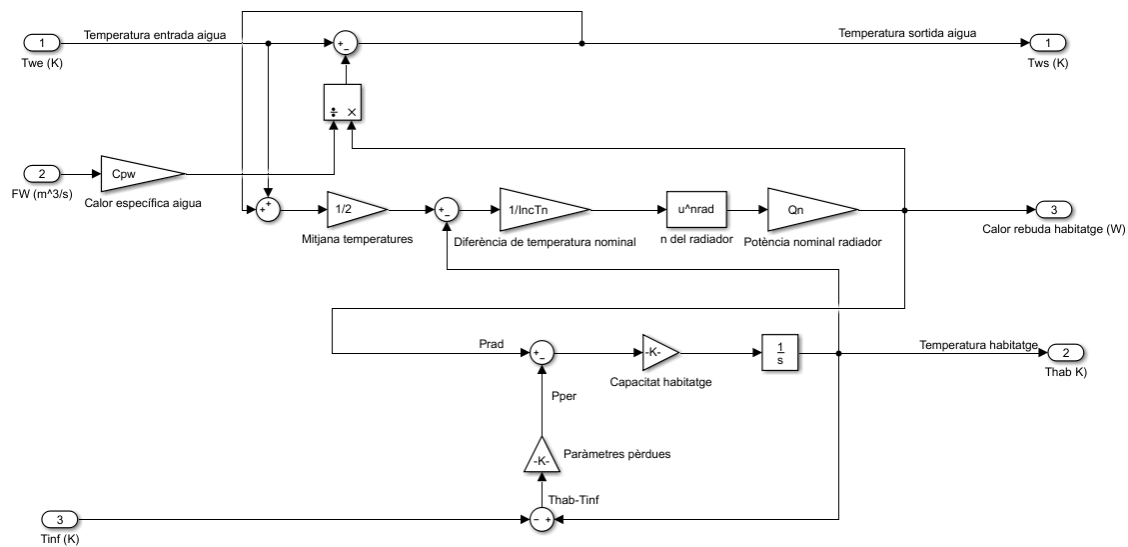


Fig. 7.3. Model del sistema de calefacció de l'habitatge.

7.4. Model integrat

El model integrat consisteix en la unió dels tres blocs anteriors. Aquests estan interrelacionats per les variables que són presents en més d'un dels blocs, i que surten d'un bloc com a outputs i entren en un altre com a inputs.

Les entrades del model integrat són les variables que no es calculen com a sortides d'algun bloc d'aquest, i que s'han d'introduir des de l'exterior. Aquestes són la intensitat de corrent, els dos cabals dels fluids i la temperatura exterior. També s'inclouen com a entrades la temperatura desitjada de l'habitatge i de la pila. A partir d'aquestes entrades i com s'ha mostrat en els apartats anteriors, s'obtenen com a sortides la temperatura de la pila i la temperatura de l'habitatge.

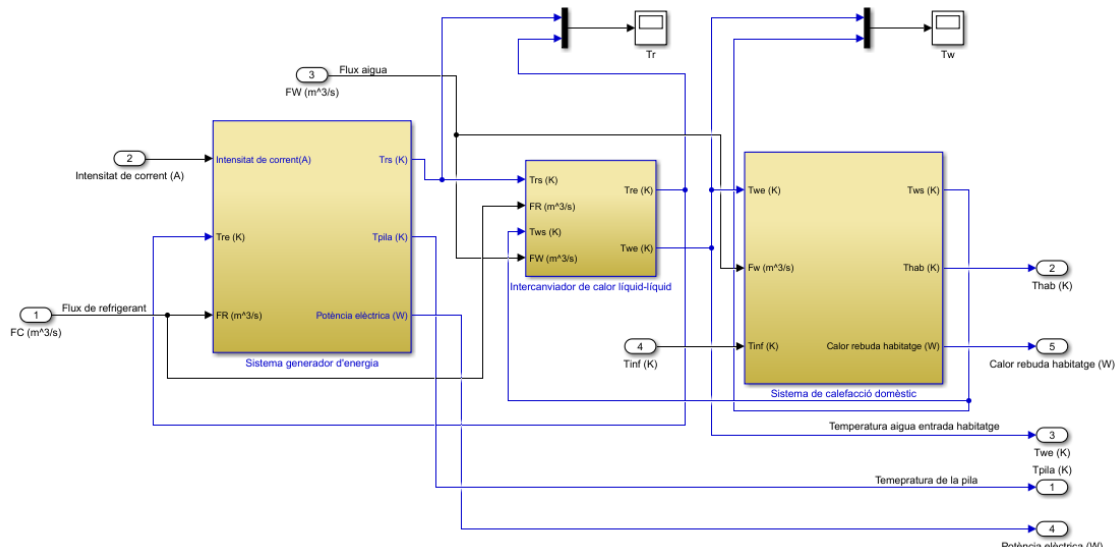


Fig. 7.4. Model integrat del sistema.

Aquest model inclou també diferents elements tant d'entrada com de sortida, ja siguin panells per observar i fer gràfics sobre el comportament de diferents variables o un rellotge per controlar el temps de simulació.

Amb tots aquests components, es dóna per completat el model i es procedeix a realitzar la simulació assignant els valors d'un cas concret a les variables d'entrada.

8. Disseny del sistema de calefacció i del sistema de control

Un cop el model ha estat implementat amb les equacions i els paràmetres corresponents, el següent pas consisteix en realitzar una simulació, analitzar els resultats obtinguts en aquesta, interpretar els valors estacionaris als quals s'ha arribat i extreure algunes conclusions d'aquests valors. Per fer-ho, cal primer acabar de determinar els paràmetres adients per al punt de treball nominal seleccionat.

Posteriorment, es procedeix a construir un sistema de control per al sistema per tal que aquest respongui i assoleixi els valors estacionaris desitjats en introduir-li una pertorbació.

8.1. Determinació final dels paràmetres per al punt de treball nominal i el punt de treball crític

Per poder realitzar una simulació, és necessari donar valor als tres paràmetres que han quedat pendents per determinar en l'apartat 6, els quals corresponen a la freqüència dels plats de refrigeració, el cabal de líquid refrigerant i la longitud de l'intercanviador líquid-líquid.

Amb l'ajuda del model, es determinen aquests valors per tal que el sistema funcioni correctament. Per això, cal ajustar-los tenint en compte dos factors: que el model ha de tenir uns paràmetres correctes quan es treballa al punt nominal (284 K a l'exterior i 294 desitjats en l'habitatge), i també ha de poder abastir l'habitatge amb potència suficient quan es treballa en el punt crític (279 K a l'exterior i 294 K desitjats en l'habitatge).

Per realitzar aquest ajust, el procediment consisteix en determinar diferents parelles de valors per a la freqüència de plats refrigerants i de longitud d'intercanvi, tenint en compte que aquests han de mantenir-se dins els rangs adequats (de 3 a 6 en el cas dels plats, de 0,5 a 2 m en el cas de la longitud), i per cada parella ajustar el cabal de refrigerant per tal que la temperatura de la pila es mantingui a 433 K.

A més, el procediment es realitza per les dues temperatures exteriors, tant la crítica com la nominal, i s'observen els resultats d'ambdós casos. Els valors que s'han d'observar són el cabal de refrigerant que s'ha ajustat, i les temperatures d'entrada i sortida d'aquest de la pila. Cal ajustar el corrent de la pila per compensar l'augment de pèrdues de potència calorífica i que l'habitatge arribi als 294 K desitjats.

Degut a la diferència de potència requerida entre el nominal i el crític, cal tenir en compte els dos punts de treball per tal de dimensionar el sistema, ja que si s'assignen els paràmetres per obtenir un funcionament òptim en el punt de treball nominal, és possible

que el sistema no pugui abastir el punt crític. Cal assolir un terme mig entre un bon funcionament en el punt nominal i en el punt crític que s'ha escollit per poder abastir en un ampli rang de temperatures exteriors.

Per aquest fet, es realitza un escombrat dels paràmetres a determinar, situant la freqüència de plats en 3, 4, 5 i 6 plats i augmentant la longitud de l'intercanviador de 0,5 a 2 m amb increments de 0,25 m, i per cada punt s'ajusta el cabal necessari per assolir els 433 K a la pila.

Per observar els resultats es representen les temperatures d'entrada i sortida del refrigerant a la pila, i amb l'ajuda d'aquestes representacions cal determinar els paràmetres amb els quals es pugui abastir el punt crític, però treballant gairebé al límit de les possibilitats del sistema, ja que així en el punt nominal es treballarà més proper al funcionament òptim. Es considera que el sistema pot abastir l'habitatge si regulant el cabal de refrigerant es pot assolir la temperatura de 433 K a la pila, mantenint aquest cabal entre 10^{-5} i $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

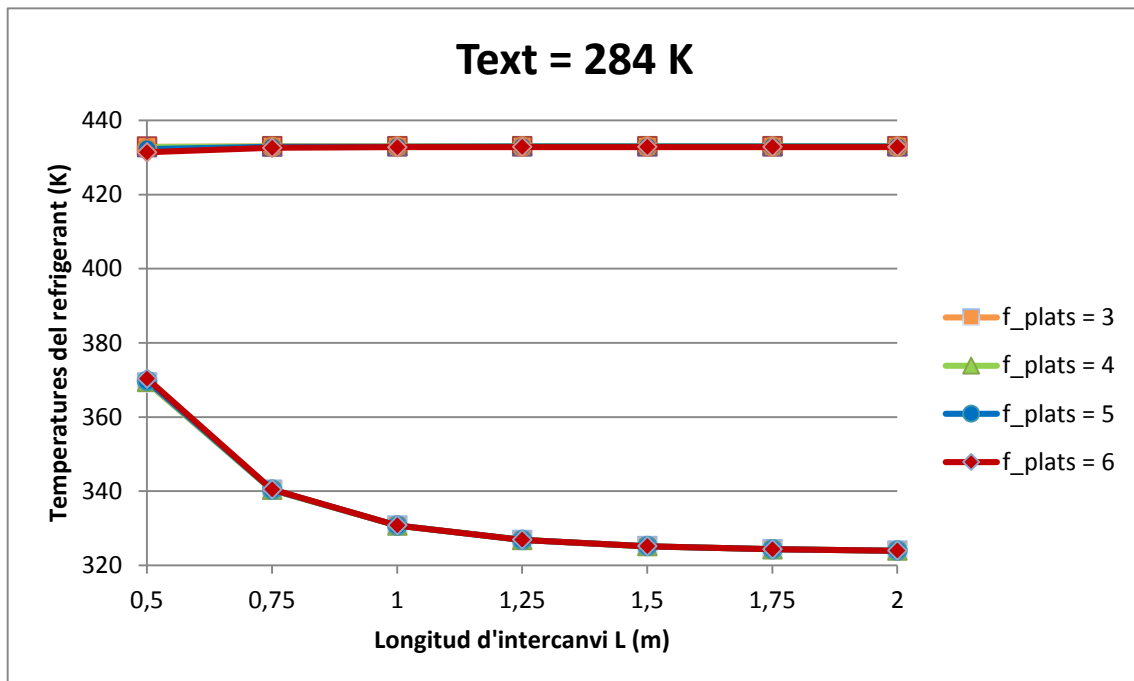


Fig. 8.1. Representació de les temperatures d'entrada (baixa) i sortida (alta) de l'aigua refrigerant en funció del nombre de plats i la longitud d'intercanvi en el punt de treball nominal.

Com es veu en el gràfic del punt nominal (Fig. 8.1), les temperatures d'entrada i sortida de l'aigua refrigerant són molt poc sensibles als canvis en el nombre de plats, ja que aquestes són considerablement superiors a les requerides per a que el sistema pugui abastir en el punt de treball nominal, i són gairebé iguals en tots els casos.

De fet, la temperatura de sortida de l'aigua refrigerant és força elevada, i en molts casos igual a la de la pila, excepte en els casos en què hi ha menys àrea d'intercanvi, on és

lleugerament inferior. Si s'apliquessin àrees d'intercanvi més baixes, amb una longitud d'intercanvi més petita i un nombre de cel·les per plat més elevat, s'aconseguiria allunyar aquestes temperatures de la de la pila, i obtenir un gradient adequat per treballar al punt nominal. Però aquest fet no permetria abastir l'habitatge en el punt de treball crític, ja que la potència requerida és gairebé un 50% superior.

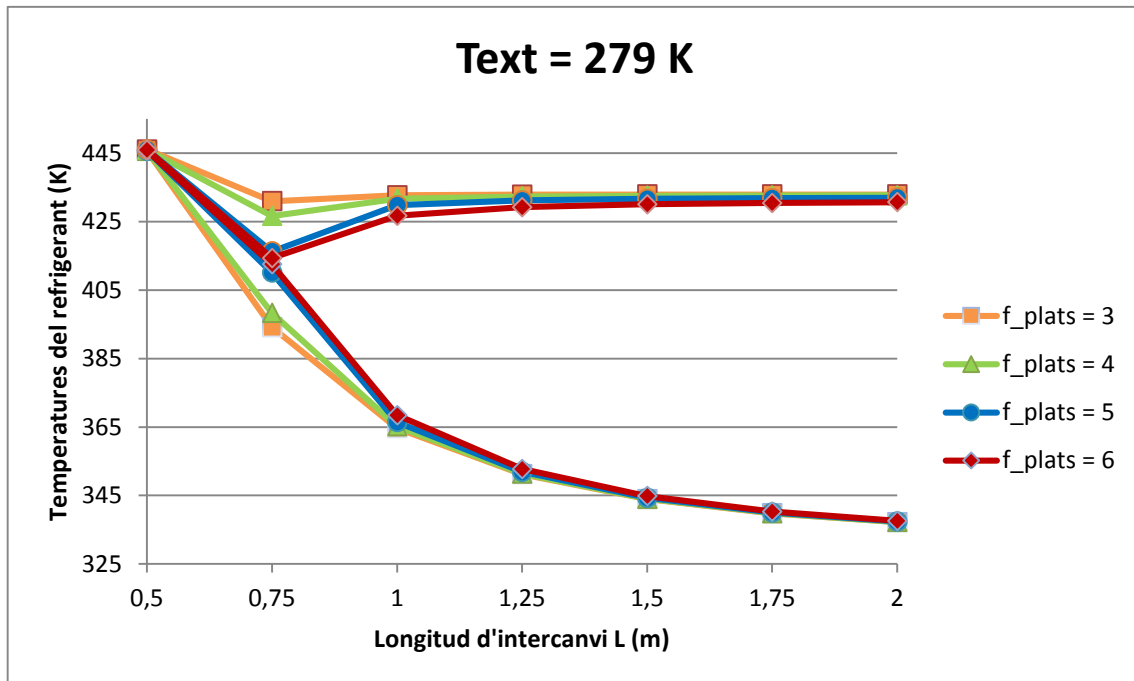


Fig. 8.2 Representació de les temperatures d'entrada (baixa) i sortida (alta) de l'aigua refrigerant en funció del nombre de plats i la longitud d'intercanvi en el punt de treball crític.

Quan es disminueix la temperatura exterior, el corrent de la pila augmenta per poder donar més potència a l'habitatge, i per tant l'aigua de refrigeració n'ha d'extreure més. Per aquest fet, com es pot observar en la Fig. 8.2, en els casos en què l'àrea de refrigeració és més petita, el sistema no pot arribar a extreure tota la potència que la pila genera, i aquesta s'escalfa superant la temperatura de funcionament (433 K). A més, l'aigua té un gradient de temperatures gairebé nul, entrant i sortint a la mateixa temperatura, que és també la de la pila.

En tots els casos, amb una longitud d'intercanvi de 0,5 m, el sistema no és capaç de refrigerar la pila en el punt crític, mentre que a partir de 0,75 m ja ho pot assolir, encara que en els casos amb un nombre menor de plats, el gradient de temperatures és molt baix. Quan la longitud és igual a 1 m o superior, gairebé no hi ha diferències en variar l'àrea de refrigeració.

Tant en el cas del punt nominal com el crític, els cabals de refrigerant en els casos en què es pot abastir el sistema són dins del rang determinat anteriorment, excepte en el cas de 0,75 m de longitud amb 6 cel·les per plat en el punt de treball crític, on el cabal és de $0,00257 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De fet, aquest punt és el que anteriorment es comentava que té un

gradient de temperatures molt baix, i que gairebé es pot considerar que no arriba a abastir el sistema.

Tenint en compte que es vol que hi hagi una certa diferència entre la temperatura de sortida de l'aigua en el punt nominal i la temperatura de la pila (en el millor dels casos, d'unes dècimes de grau), cal que la longitud de l'intercanviador sigui menor a 1 m, ja que és l'única zona del gràfic del punt nominal on es pot observar una lleugera diferència, i que el nombre de cel·les per plat sigui 5 o 6.

A més, també cal que la longitud sigui superior a 0,75 m, ja que pels dos casos amb menys plats de refrigeració, per una longitud de 0,75 m el gradient de temperatures és massa baix. Amb aquestes informacions, es pretén trobar un punt amb 5 o 6 cel·les per plat, que tingui una longitud entre 0,75 i 1 m, i que tingui un gradient de temperatures en el punt crític al voltant de 30 graus. Per això, es realitza una representació en el punt crític de les temperatures d'entrada i sortida ajustant els paràmetres als límits acotats.

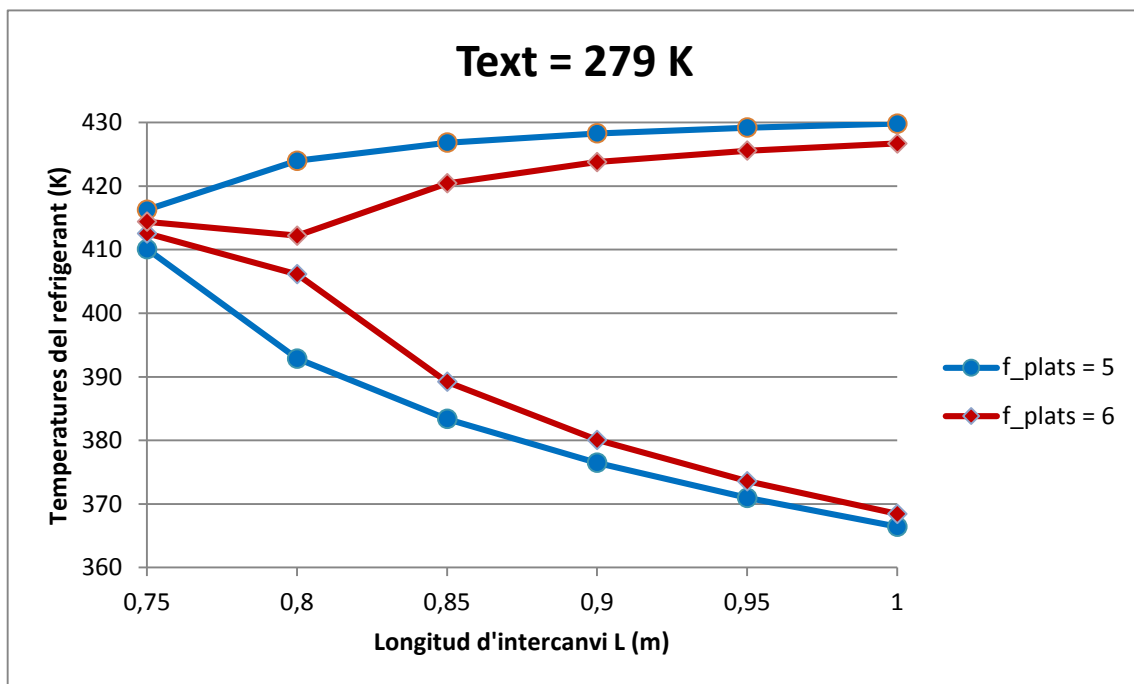


Fig. 8.3. Representació de les temperatures d'entrada (baixa) i sortida (alta) de l'aigua refrigerant en funció del nombre de plats i la longitud d'intercanvi en el punt de treball crític amb els nous límits.

Com es pot observar en la Fig. 8.3, en aquest interval de longituds el gradient de temperatures és molt sensible tant a l'àrea d'intercanvi com a l'àrea de refrigeració. Com ja s'havia vist, els punts amb una longitud de 0,75 m tenen un gradient de temperatures massa baix, i cal augmentar fins a 0,8 m en el cas de 5 cel·les per plat i fins a 0,85 m en el de 6, per tal de tenir el gradient desitjat (al voltant dels 30 K).

En ambdós casos, el cabal es manté dins el rang acotat anteriorment tant en el punt

nominal com en el punt crític, i el gradient de temperatures és aproximadament de 31 K. Per tant, l'únic paràmetre que queda per escollir entre aquests dos és la temperatura de sortida de l'aigua en el punt nominal (Fig. 8.4), que és més distant de la de la pila en el cas de les 6 cel·les per plat i 0,85 m de longitud (432,71 K). Per aquest fet, s'assignen aquests valors als paràmetres corresponents, i el cabal ajustat en el punt nominal correspon a $3,23 \cdot 10^{-5}$, valor que s'assigna com a cabal nominal del sistema refrigerant.

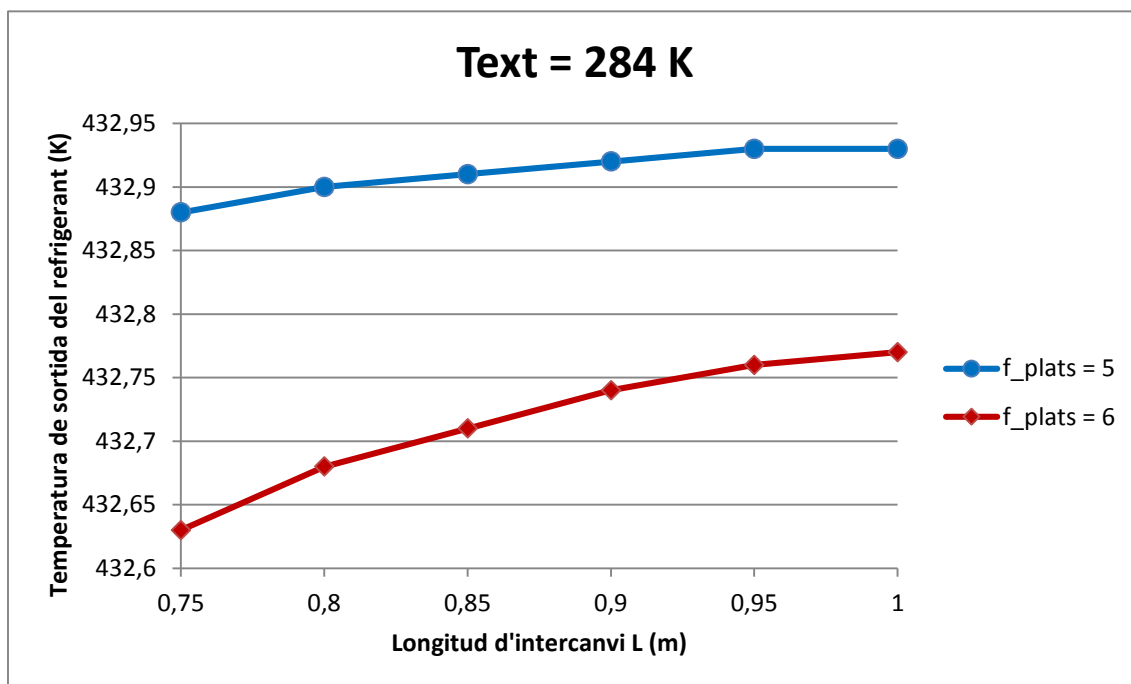


Fig. 8.4. Representació de la temperatura de sortida de l'aigua refrigerant en funció del nombre de plats i la longitud d'intercanvi en el punt de treball nominal amb els nous límits.

T = 284 K					
f_plats	6	L	Twe	Tws	FW
		0.75	340.48	432.63	0.0000341
		0.8	337.7	432.68	0.0000331
		0.85	335.43	432.71	0.0000323
		0.9	333.57	432.74	0.0000317
		0.95	332.04	432.76	0.0000312
		1	330.76	432.77	0.0000308
T = 279 K					
f_plats	6	L	Twe	Tws	FW
		0.75	412.55	414.39	0.00257
		0.8	406.12	412.2	0.000775
		0.85	389.21	420.43	0.000151
		0.9	380.07	423.78	0.000108
		0.95	373.57	425.57	0.0000907
		1	368.44	426.72	0.0000809

Taula 8.1. Exemple de taula emprada per a realitzar la representació de les diferents corbes anteriors (en verd el punt escollit).

Amb tots aquests valors, queden totalment determinats els paràmetres nominals del sistema, i aquest està llest per la simulació. Cal, però, assumir que el fet que la temperatura de sortida de l'aigua refrigerant sigui tant propera a la temperatura de la pila pot ser una font de problemes, ja que, en les zones on el gradient de temperatures és molt baix, l'intercanvi de calor és molt poc eficaç i per tant pot conduir a gradients de temperatura en la superfície de la pila.

Degut que aquest tema s'ha tractat amb anterioritat, es considera que el model de plats de refrigeració pot solucionar aquest problema, i es deixa com a treball futur estudiar l'efecte que l'alta temperatura de l'aigua refrigerant pot tenir sobre el funcionament, i realitzar un model en què el valor d'aquesta temperatura sigui més baix.

8.2. Anàlisi dels resultats de simulació en llaç obert

Un cop s'han determinat tots els paràmetres del punt nominal, ja es pot realitzar la primera simulació en llaç obert i, si tots han estat ben determinats, els valors estacionaris dels estats haurien d'assolir els valors desitjats. Els valors de tots els paràmetres es poden observar en la Taula 8.2.

Pila PEM		Sistema de calefacció	
N_c	95 cel·les	C_{p_w}	$4,18 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
I	200 A	$C_{p_{aire}}$	$1,6 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Sistema de refrigeració		G_{per}	$3,65 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
U_r	$622,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	N_r	15 radiadors
A	$0,04 \text{ m}^2$	ΔT_n	40 K
G_c	$6 \text{ cel·les} \cdot \text{plat}^{-1}$	n	1,35
C_{p_r}	$4,18 \cdot 10^6$	Q_n	89,4 W
C_{pila}	$691 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{Kg}^{-1}$	n_{elem}	10 elements/radiador
M_{pila}	50 Kg	V_{hab}	360 m^3
v'_r	$3,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	v'_w	$0,00016 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Intercanviador de calor líquid-líquid			
U_{int}	$1225 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$		
L	0,85 m		

Taula 8.2. Paràmetres del punt de treball nominal.

Així doncs, es realitza una primera simulació en el punt de treball nominal ($T_{ext} = 284 \text{ K}$), i s'observen les representacions del comportament de les diferents variables al llarg d'un dia. Els estats inicials s'han assignat ja al valor estacionari, i per tant els valors són constants en el temps.

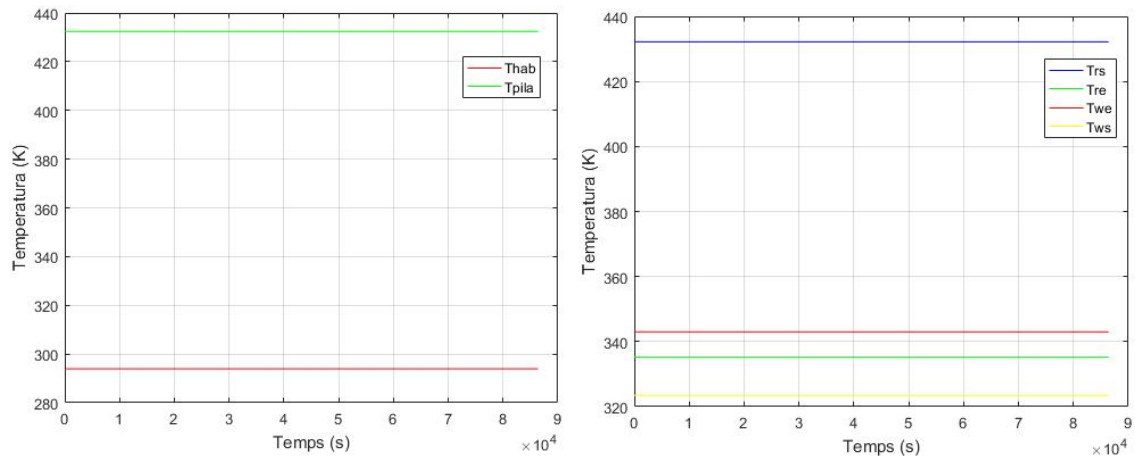


Fig. 8.5. Representacions de les diferents temperatures del sistema al llarg del temps de simulació.

Com es pot veure en la Fig. 8.5, les temperatures es mantenen constants en tots els casos si no s'aplica una pertorbació. Aquests valors corresponen als desitjats, i per tant es pot afirmar que els paràmetres del model han estat correctament determinats. Seguidament, es realitza un estudi de l'efecte que tenen certes pertorbacions sobre els valors estacionaris de les temperatures del sistema.

8.2.1. Resposta a una pertorbació en la temperatura exterior

D'entre aquestes pertorbacions, la més important i més comú en el cas real és una variació en la temperatura exterior. Per aquest fet, és la primera que s'estudia, situant un graó unitari en el segon 100 de la simulació, amb el qual la temperatura exterior passarà de 284 a 283 K. Per aquest estudi, es simula una hora enlloc d'un dia sencer.

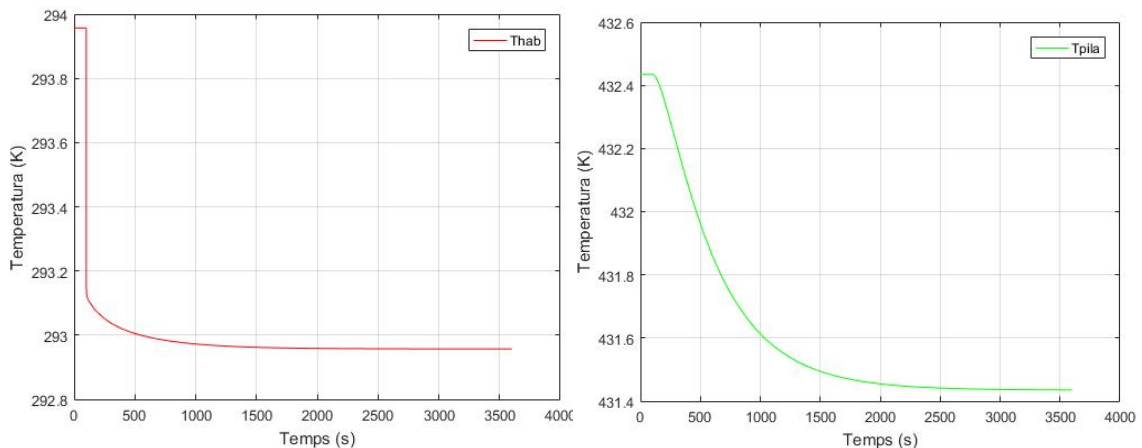


Fig. 8.6. Representacions gràfiques de les respostes a un graó unitari en la temperatura exterior de les temperatures de la pila i de l'habitatge.

Clarament, s'observa en la Fig. 8.6 que en disminuir un grau la temperatura exterior, ambdues temperatures disminueixen exactament un grau, però la temperatura de l'habitatge ho fa molt més ràpidament que la de la pila (mentre que la primera s'estabilitza al voltant dels 1000 segons, la segona no ho fa fins passats els 2000 segons). De les

representacions es pot veure també que aquestes temperatures ofereixen una resposta directa a una pertorbació en la temperatura exterior.

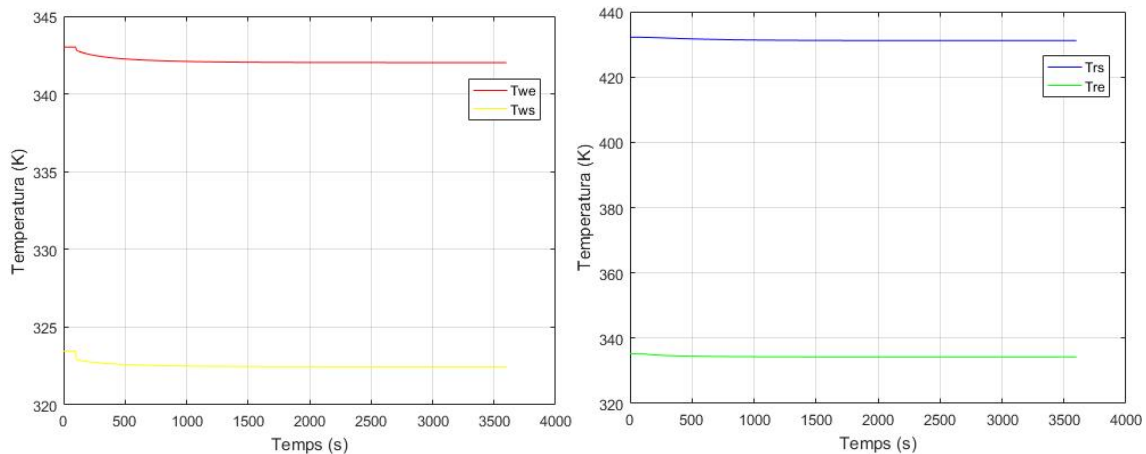


Fig. 8.7. Representacions gràfiques de les respostes a un graó unitari en la temperatura exterior de les temperatures del l'aigua refrigerant i de l'aigua de calefacció.

Pel que fa a les temperatures de les dues aigües, aquestes responen de manera molt semblant a les temperatures anteriors, disminuint un grau també en tots els casos. A més, també responen de forma directa i amb un temps d'assentament bastant semblant als casos anteriors (més llarg en el cas de la refrigeració i més curt en el de la calefacció).

8.2.2. Resposta a una pertorbació en el corrent de la pila

Una altra pertorbació que és interessant d'estudiar és la que es pot donar al corrent de la pila, i conèixer la resposta que tenen les temperatures respecte aquesta és interessant sobretot de cara a propers apartats. Per això, s'aplica, com en l'apartat anterior, un graó de 20 A en el segon 100 de simulació, que farà passar el corrent de 200 a 220 A, i s'observen les respostes obtingudes.

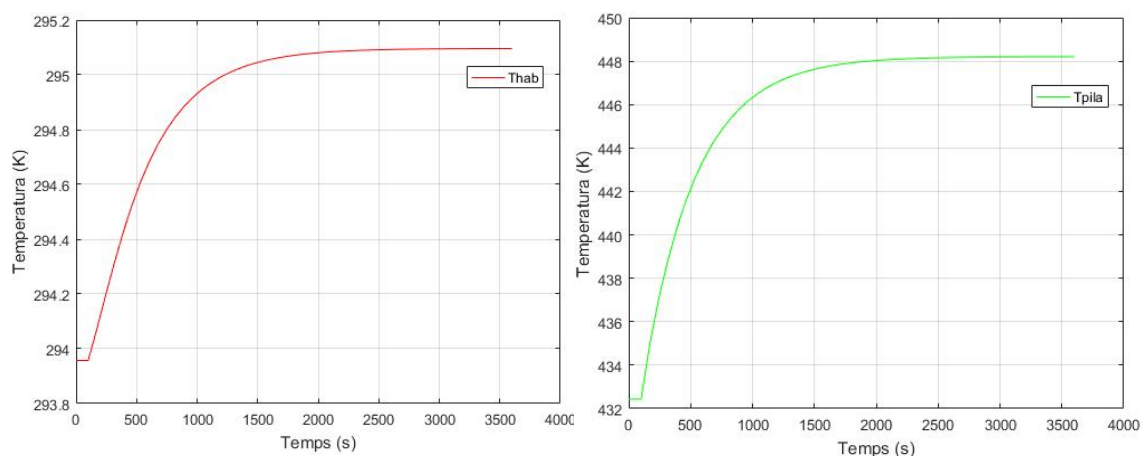


Fig. 8.8. Representacions gràfiques de les respostes a un graó unitari en el corrent de la pila de la temperatura de l'habitatge i de la pila.

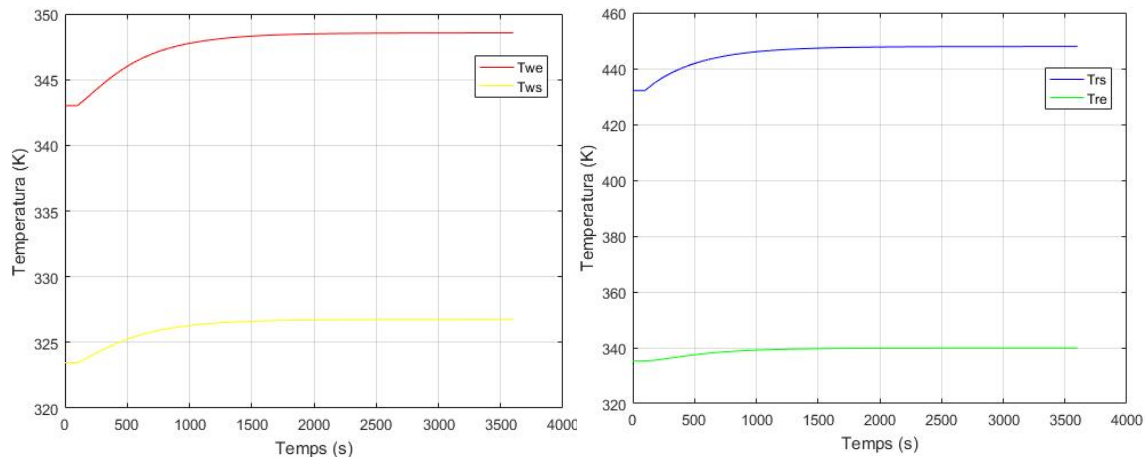


Fig. 8.9. Representacions gràfiques de les respostes a un graó en el corrent de la pila de les temperatures de l'aigua refrigerant i de calefacció.

En aquest cas, la resposta és molt semblant en tots els casos, i al segon 2500 gairebé totes les variables han assolit un valor estacionari. Totes ofereixen una resposta directa a la pertorbació, però algunes temperatures es veuen considerablement més afectades que d'altres pel que fa al seu increment.

Per un augment de 20 A en el corrent de la pila, la temperatura d'aquesta augmenta uns 15 K, mentre que la temperatura de l'habitatge només ho fa en poc més d'un grau. Pel que fa a l'aigua refrigerant i de calefacció, la primera augmenta de forma semblant a la pila a la sortida però ho fa menys en l'entrada, mentre que la segona augmenta molt més que l'habitatge (uns 4-5 graus en funció de l'entrada o la sortida).

8.2.3. Resposta a una pertorbació en el cabal d'aigua refrigerant

La següent entrada de la qual val la pena observar l'efecte és el cabal d'aigua refrigerant. Aquest estudi, com en el cas anterior, també és bàsic de cara als següents apartats, i cal conèixer bé com afecta al sistema. Per això, també s'aplica un graó positiu del 10% del cabal nominal en el segon 100 de simulació, i s'observen els comportaments de les temperatures del sistema.

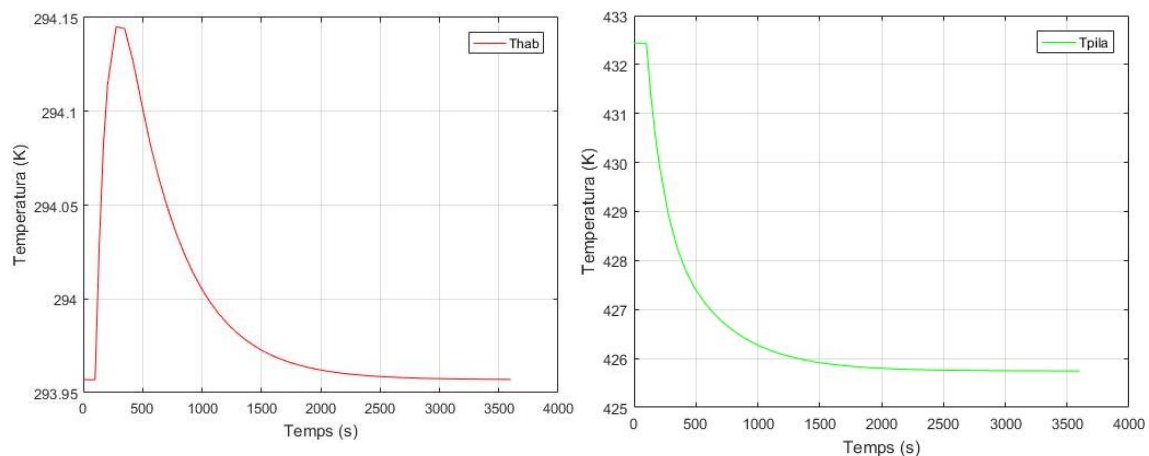


Fig 8.10. Representacions gràfiques de les respostes a un graó en el cabal d'aigua refrigerant de la temperatura de la pila i de l'habitatge.

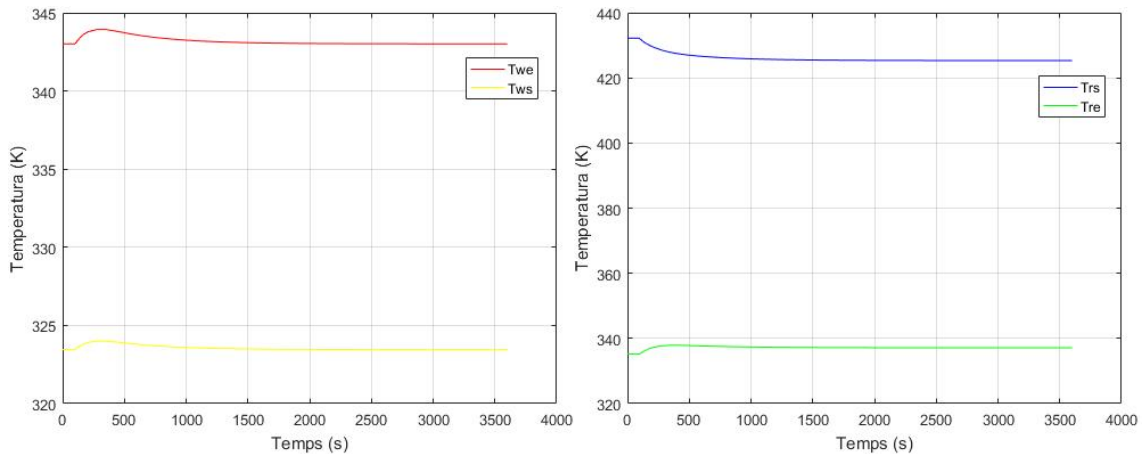


Fig 8.11. Representacions gràfiques de les respostes a un graó en el cabal de l'aigua refrigerant i de calefacció.

Com es pot observar en les figures anteriors, la pertorbació en el cabal de refrigerant té un efecte diferent en cada sistema. En el sistema de calefacció de l'habitatge, la resposta de la temperatura d'aquest i la de l'aigua són molt semblants, i mostren un increment gairebé instantani de la temperatura per després, al cap d'uns 2000 segons, tornar a la temperatura estacionària anterior. Aquest increment, en el cas de la temperatura de l'habitatge és de poques dècimes de grau, i d'un grau en el cas de l'aigua de calefacció.

En el cas de la pila i del sistema de refrigeració, la temperatura de la pila respon directament a un increment del cabal, reduint el seu valor en uns 6-7 graus i amb un temps de resposta més ràpid que en els apartats anteriors. Pel que fa a la temperatura de l'aigua del refrigerant, aquest increment fa que la temperatura de sortida baixi mentre que la temperatura d'entrada puja, reduint l'increment de temperatures en uns 10 graus.

8.2.4. Resposta a una pertorbació en el cabal d'aigua de calefacció

Per últim, cal estudiar les respostes a una pertorbació en l'última entrada, el cabal de l'aigua de calefacció. Per aquest fet, s'aplica un graó positiu en aquest valor al segon 100 de simulació, amb un augment del 10%, i s'observen les respostes de les temperatures.

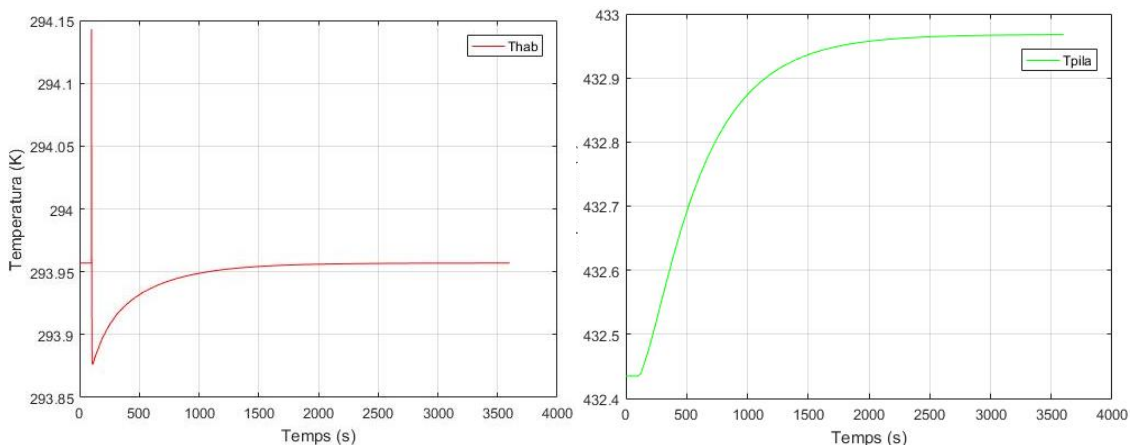


Fig 8.12. Representacions gràfiques de les respostes a un graó en el cabal d'aigua de calefacció de la temperatura de la pila i de l'habitatge.

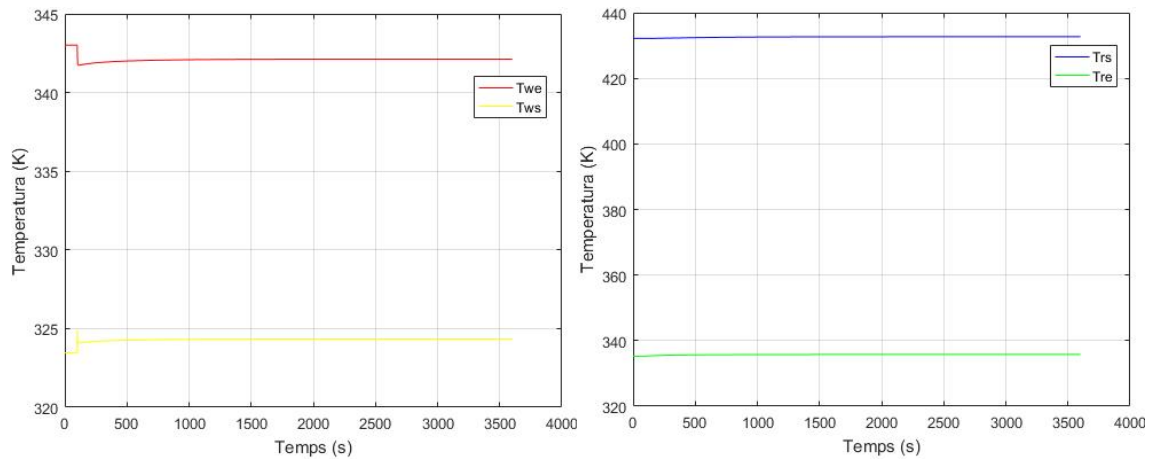


Fig 8.13. Representacions gràfiques de les respostes a un graó en el cabal de l'aigua de calefacció de les temperatures de l'aigua refrigerant i de calefacció.

Observant les figures anteriors, l'efecte d'aquesta pertorbació en el sistema de l'habitatge es manifesta de forma diferent en el cas de l'aigua i en el cas de la temperatura d'aquest. La temperatura de l'habitatge final no es veu afectada, i l'únic fet que s'observa és que aquesta fa una oscil·lació en aplicar la pertorbació, pujant unes dècimes de grau per sobre del valor estacionari, després baixant també unes dècimes d'aquest i aproximadament als 1000 segons de simulació el valor ja torna a ser l'estacionari.

Pel que fa a l'aigua de calefacció, aquesta sofreix un increment de temperatura en la sortida i un decrement en la d'entrada, semblant al cas de l'aigua de refrigeració en l'apartat anterior, però en aquest cas la resposta té un sobrepuig per acabar situant-se entre 1 i 2 graus més alta o més baixa en cada cas.

La temperatura de la pila té una resposta directa a la pertorbació, augmentant el seu valor en mig grau i assolint l'estacionari en uns 2000-2500 segons, com en la majoria de casos. Finalment, les temperatures de l'aigua refrigerant mostren una resposta molt semblant a la pila, augmentant directament també unes dècimes de grau tant en l'entrada com en la sortida.

Pertorbació	T_{hab}	T_{pila}	T_w	T_r
Text ↓ 1 grau	Totes les temperatures baixen 1 grau			
I ↑ 20 A (10%)	↑	↑↑↑	↑↑	↑↑↑
FR ↑ 10%	=	↑↑	=	$T_s ↓, T_e ↑$
FW ↑ 10%	=	↑	$T_s ↑, T_e ↓$	↑

Taula 8.3. Resum de les respostes de les diferents temperatures a les pertorbacions en les entrades (1 - baix, 2 - mitjà, 3 - alt).

8.3. Definició del sistema de control

Disposant de l'anàlisi realitzat en els dos apartats anteriors, ara es pretén dissenyar un sistema de control que reguli els inputs manipulables del sistema per mantenir les temperatures d'aquest al valor que es desitja quan hi ha una pertorbació o bé algun canvi de consigna.

El sistema ha de fer front majoritàriament a canvis en el valor de la temperatura exterior, ja que és la que varia més freqüentment en una aplicació real, però també a un canvi en les temperatures desitjades, sobretot en la de l'habitatge. Mitjançant un sistema de control s'ajustaran la resta d'entrades, corresponents als cabals de les aigües dels dos circuits i al corrent de la pila.

Dels anàlisis anteriors, es pot pensar a simple vista que hi ha un aparellament més evident, ja que en estat estacionari, la temperatura de la casa no pot canviar si no ha canviat el corrent de la pila, que es qui determina la font de calor del sistema. Per tant, cal que un controlador ajusti el corrent de la pila per tal d'assolir la temperatura desitjada en l'habitatge. Degut que un canvi en el corrent suposa un canvi en la temperatura de la pila, també s'ha de controlar aquesta variable, i això es fa, com s'ha vist en l'apartat anterior, mitjançant el valor del cabal d'aigua refrigerant.

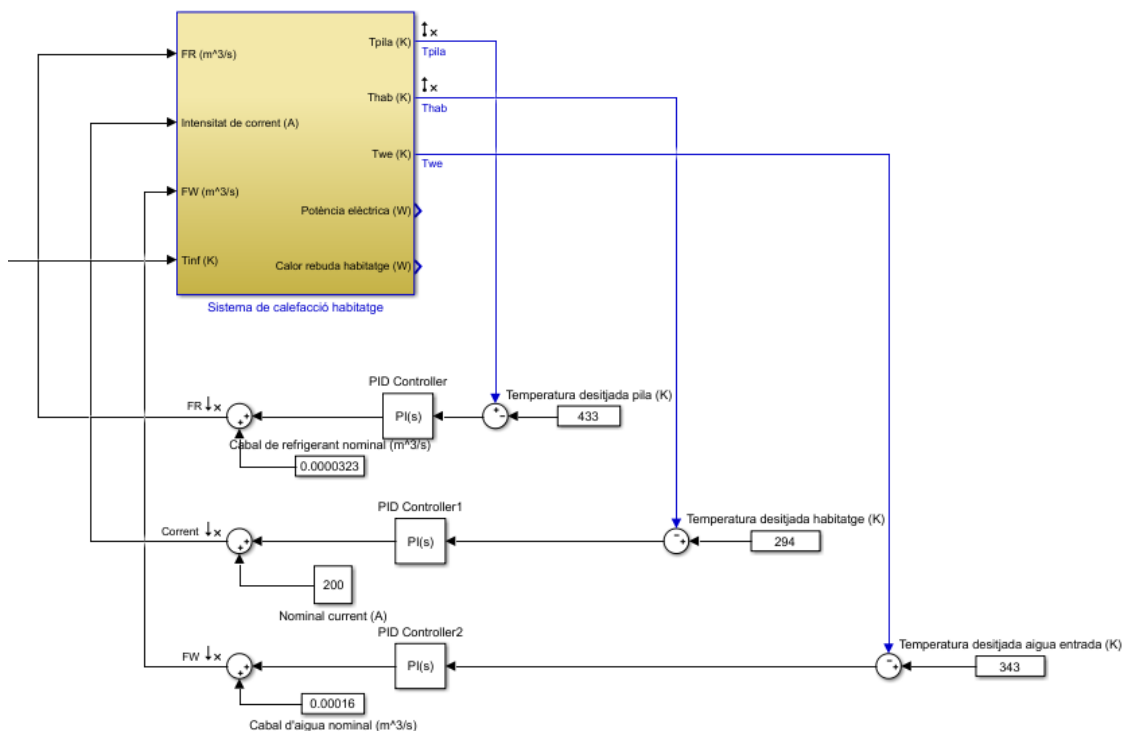


Fig. 8.14. Esquema del sistema integrat amb el bloc del sistema de calefacció i els tres llaços de control PI.

Finalment, es creu convenient considerar que amb l'entrada restant, corresponent al cabal de l'aigua de calefacció, es pot controlar la temperatura d'aquesta aigua a l'entrada

o la sortida del circuit, per assolir els valors correctes per a una transferència de calor òptima. El fet de tenir tres llaços de control pot suposar un problema de cara al funcionament del model, i és per això que en cas que no s'aconseguís realitzar tres controls, aquest últim és el primer del qual es prescindiria.

De cara a realitzar el model d'aquests controladors, amb els resultats de l'apartat anterior, es decideix realitzar un control descentralitzat amb tres llaços de control amb controladors PI. El valor de sortida de les temperatures a controlar es resta del valor desitjat, obtenint l'error per cadascuna d'elles. Aquest error és el que arriba al bloc del controlador PI, i la sortida d'aquest es suma al valor calculat anteriorment com a valor nominal (Fig. 8.14).

El guany d'un controlador PI depèn de dues constants, la proporcional (K_p) i la integral (K_i), que es poden determinar emprant diversos mètodes. La funció de transferència del controlador té la següent forma:

$$K = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{Eq. 8.1}$$

Així doncs, cal determinar els valors de les constants dels controladors per tal que aquests tinguin un comportament adequat, és a dir que facin arribar el sistema als valors estacionaris desitjats amb un temps relativament curt i un perfil raonablement suau. Per aquest fet, es proven dos mètodes: el mètode de tuning automàtic ofert pel software Matlab i el mètode Ziegler-Nichols.

8.3.1. Determinació de les constants dels tres llaços de control pel mètode automàtic de Simulink

A diferència de la majoria de mètodes emprats per determinar els guanys dels controladors, el software Simulink ofereix una eina automàtica de disseny de controladors PID. Segons es pot observar en la descripció d'aquesta eina [27], aquesta utilitza un mètode automàtic que no es descriu amb més profunditat, però amb el qual es pot obtenir un controlador que assoleixi les característiques de robustesa (marges de guany i de fase adequats), temps de resposta o alçada de sobrepuig que es desitgen.

Aquest mètode no és ni manual ni un sistema basat en regles com la resta de mètodes, i aquest fet fa que sigui apte per models d'alt ordre, models inestables i altres tipus de models que els mètodes convencionals no poden controlar. A més, es poden dissenyar controladors tant per sistemes SISO com per sistemes MIMO, com és el cas d'aquest projecte, ja sigui emprant diferents llaços de control o amb altres eines més complexes de control.

El procediment per determinar les constants del controlador és prou simple i visual, però això no treu que el control dissenyat sigui d'una qualitat molt elevada. El primer pas, un

cop s'ha ubicat el bloc del controlador PID de Simulink, és escollir quin tipus de control es desitja. En aquest cas, es desitja un control PI, com ja s'ha dit anteriorment.

Per tal d'escollir les constants de cadascun dels tres controladors per separat, cal prémer el botó *Tune...* que ofereix el software Simulink. Un cop premut, aquest obre una finestra avisant que està fent una linealització de la planta al voltant del punt d'operació estacionari que s'ha assignat, que en aquest cas correspon al punt de treball nominal. Quan aquesta està feta, s'obre finalment la finestra per fer el tuning del controlador.

En aquesta finestra, però, no s'ofereix l'opció de realitzar aquest tuning degut que, segons es pot observar en un avís a la part inferior, l'eina no aconsegueix trobar cap tuning que pugui estabilitzar la planta per cap dels tres controladors. Per tant, es dedueix que amb aquest mètode no es poden determinar les constants dels tres controladors.

8.3.2. Determinació de les constants dels tres llaços de control pel mètode Ziegler-Nichols

Degut que no s'ha pogut dissenyar els controladors amb l'aplicació de Simulink, s'opta per intentar realitzar aquest disseny amb un mètode alternatiu, com és el mètode de Ziegler-Nichols. Aquest mètode té dues variants, una gràfica i una numèrica, cadascuna amb unes restriccions de funcionament.

8.3.2.1. Variant gràfica del mètode de Ziegler-Nichols

Per obtenir les constants d'un controlador mitjançant la variant gràfica del mètode Ziegler-Nichols, cal obtenir la corba de la resposta que té cada sortida quan s'aplica un graó en la seva entrada corresponent. Per poder realitzar el disseny amb aquest mètode, cal que la corba tingui forma de S, en la qual es pugui definir un temps de retard L i una constant de temps T , tal i com es pot observar en la Fig. 8.15.

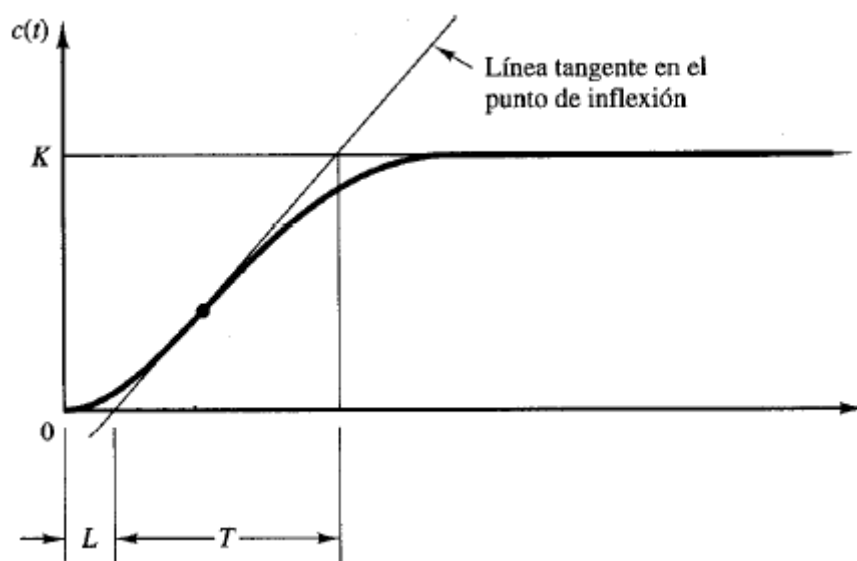


Fig. 8.15. Corba de resposta en forma de S [28].

Les corbes de les respostes de les sortides corresponents a un graó en l'entrada es poden observar en l'apartat 8.2, on s'estudien les relacions entre les entrades i les sortides del model. Per a les parelles que s'han designat per al control, es pot observar que les corbes no tenen forma de S en cap dels casos, i que per tant el mètode de Ziegler-Nichols gràfic no és una opció per al disseny d'aquests controladors.

8.3.2.2. Variant numèrica del mètode de Ziegler-Nichols

Un cop s'ha observat que el mètode gràfic no és una possibilitat, es procedeix a intentar-ho amb el mètode numèric. Aquest mètode consisteix en situar un controlador sense acció integral ni derivativa, amb el qual aquest es converteix en un controlador proporcional. Aleshores, cal incrementar el valor d'aquesta constant fins que la resposta corresponent realitza oscil·lacions d'amplitud constant, punt en què es determina la constant proporcional crítica K_{cr} i el període crític P_{cr} [28].

Per dur a terme aquest mètode, es situa un bloc de guany proporcional en la posició on s'ha de situar el controlador i, començant per un valor molt baix, s'augmenta el valor d'aquest fins que el sistema arriba al punt crític de la inestabilitat. Si no s'arriba a cap K_{cr} , aquest mètode no es pot dur a terme.

En aplicar el bloc en el llaç de control de la temperatura de la pila, el primer valor de guany es situa a 10^{-7} , i es va augmentant fins que es fa inestable al valor $5,73 \cdot 10^{-5}$, però en situar el guany en $5,72 \cdot 10^{-7}$ no s'observa cap oscil·lació, sinó que aquest assoleix el valor estacionari exacte. Com que no es troba cap valor de constant proporcional que faci oscil·lar la resposta, es dedueix que no es poden determinar les constants dels controladors mitjançant el mètode numèric de Ziegler-Nichols. Tot i així, es prova de dissenyar els altres dos controladors, també sense èxit.

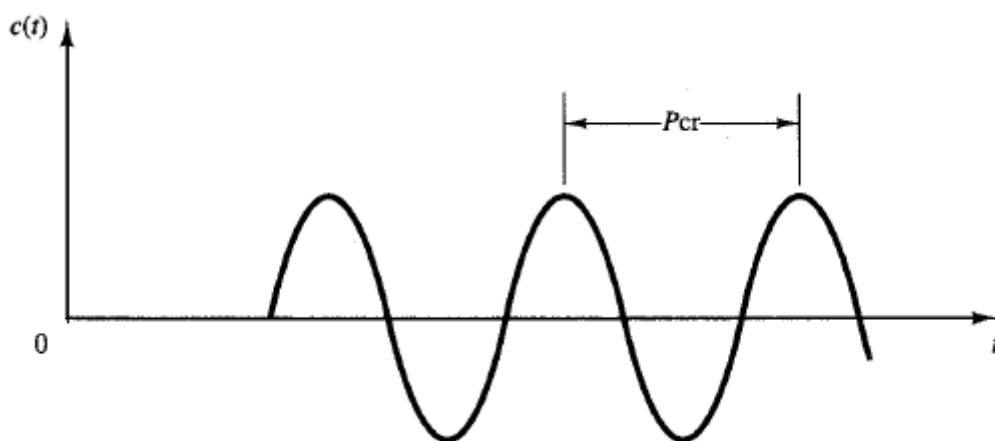


Fig. 8.16. Corba de resposta amb oscil·lacions crítiques [28].

8.3.3. Anàlisi numèric de les relacions entre els inputs i outputs escollits

Un cop s'han determinat les dues variables manipulades i les dues variables controlades, cal analitzar numèricament quin és el millor aparellament de les entrades i les sortides. Per aquest fet, cal obtenir un model numèric lineal del sistema, que s'obté mitjançant l'eina de linealització de Simulink.

Es té com a entrades del sistema els cabal d'aigua refrigerant i el corrent de la pila, i com a sortides les temperatures de l'habitatge i de la pila. A més, cal linealitzar al voltant d'un punt, que en aquest cas correspondrà al punt nominal de treball. El resultat de la linealització són 4 funcions de transferència que relacionen cada entrada amb cada sortida i també les matrius A, B, C i D que defineixen el funcionament del sistema segons la formulació d'espai d'estats.

Disposant d'aquestes funcions i matrius, es poden obtenir coeficients que defineixen el funcionament del model i les relacions entre entrades i sortides a diferents freqüències de treball, i així poder dissenyar posteriorment un bon sistema de control.

8.3.3.1. Estudi de l'RGA del sistema

Un dels indicadors interessant d'analitzar és la matriu RGA corresponent al sistema, amb les variables manipulades i controlades escollides. Aquesta dona una idea de les interaccions entre les entrades i les sortides del sistema linealitzat, i per cada parell d'aquestes dona un valor que permet interpretar si la influència d'una en l'altra és forta o feble, i si aquesta relació es veu influenciada per les altres entrades. Una matriu RGA propera a la identitat indica molt poca interacció entre els diferents canals entrada-sortida escollits, la qual cosa fa preveure que un control descentralitzat funciona correctament.

Per realitzar un bon estudi, cal obtenir els valors de la matriu a diferents freqüències i realitzar una representació dels valors que corresponen a l'aparellament que s'ha decidit en l'apartat anterior, els quals es trobaran en la diagonal de la matriu. En ser la RGA una matriu 2X2, els dos elements de la diagonal de la RGA són iguals, i són els que es representen i que han de valdre 1. Per a obtenir la matriu RGA, mitjançant el Matlab es designa un rang de freqüències de 10^{-5} fins a 10^2 , i s'obté la matriu de funcions de transferència freqüencial G_w . A partir d'aquí, s'obté la matriu RGA mitjançant l'expressió de l'equació Eq. 8.2., on el producte és un producte element a element.

$$RGA_w = G_w \cdot (G_w^{-1})^T \quad \text{Eq. 8.2}$$

Un cop es disposa d'aquesta matriu, es representa el valor absolut de l'element situat en la diagonal d'aquesta en funció de la freqüència en un eix semi logarítmic, i s'observa el comportament d'aquest valor (Fig. 8.17).

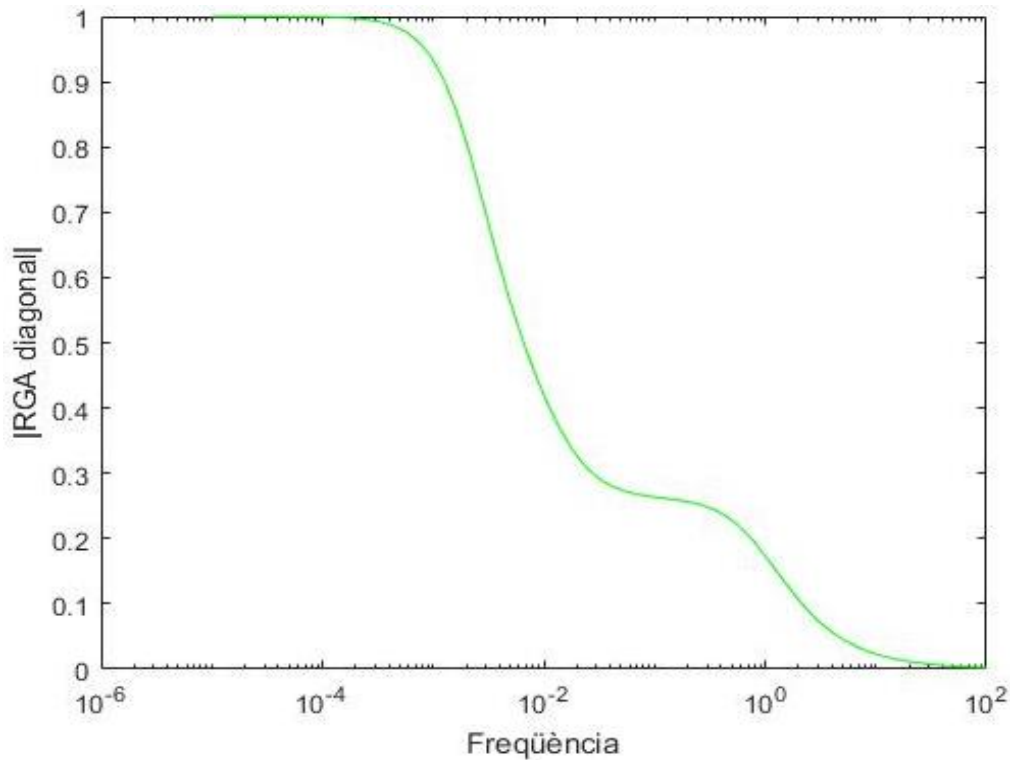


Fig. 8.17. Representació del valor de la diagonal de la matriu RGA en funció de la freqüència (eix semi logarítmic).

Es pot observar que aproximadament fins freqüències de 10^{-3} el valor de la diagonal de la matriu RGA és 1, mentre que a partir d'aquesta freqüència el valor baixa en picat fins a 0,25, on s'atura lleugerament el descens durant una dècada de freqüència per després tornar a caure en picat fins al 0.

L'interpretació d'aquest comportament és que a baixes freqüències ($<10^{-3}$), el sistema de control aparellat com s'ha indicat anteriorment ($I-T_{hab}$, $FR-T_{pila}$) ofereix una resposta sense interaccions ja que el valor és igual a 1. Per tant, el controlador és l'adequat a freqüències baixes. Conforme la freqüència va augmentant, l'aparellament perd solidesa ja que el valor s'acosta cada vegada més a 0.

Com que en aquest sistema les pertorbacions corresponen a canvis en la temperatura, que solen tenir una freqüència baixa, es prioritza el bon funcionament a aquestes freqüències i, per tant, es considera que l'aparellament realitzat és l'adequat. Fins a valors de freqüència d'entre 10^{-3} i 10^{-2} (el valor de RGA no cal que sigui exactament 1) el sistema té una bona resposta, i cal tenir en compte que a partir d'aquests el sistema de control pot deixar d'oferir un bon funcionament.

8.3.4. Determinació de les constants de dos llaços de control pel mètode automàtic de Simulink

Degut que no s'ha pogut obtenir un sistema amb tres llaços de control amb un bon funcionament, es decideix prescindir, com ja s'havia mencionat anteriorment, del control

sobre l'aigua de calefacció. Aquest fet suposarà que, en treballar fora del punt nominal, les temperatures d'aquesta aigua no seran les òptimes per a un sistema de calefacció, i caldrà analitzar si les variacions d'aquesta temperatura són massa elevades i el que és més important si la temperatura mitjana es mantindrà al voltant dels 333 K, que és el que demana el fabricant de radiadors.

El procediment és el mateix que l'emprat en l'apartat 8.3.1, en què es determinen les constants proporcional i integral dels controladors mitjançant l'eina automàtica de Simulink. En primera instància, la finestra del programa té un aspecte com el que es pot observar en la Fig. 8.18, que fa referència al controlador cabal d'aigua de refrigeració – temperatura de la pila.

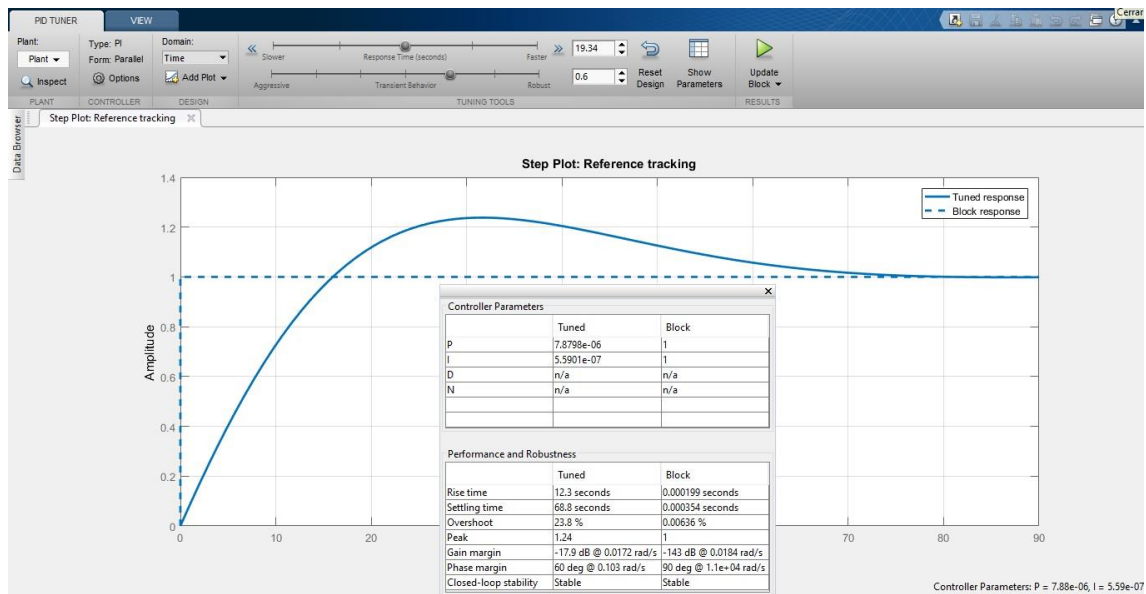


Fig. 8.18. Finestra de tuning del controlador oferta per l'eina de Simulink.

En aquesta es pot observar una corba discontinua que correspon a un graó de 0 a 1 en l'amplitud, corresponent a la resposta del sistema amb les constants del controlador inicials, una corba contínua que correspon a la resposta a un graó amb les noves constants del controlador, en la part inferior dreta es poden veure els valors d'aquestes constants i en la part central una taula amb les dades d'aquesta nova resposta, amb el temps d'assentament, el sobrepuig, el marge de guany i de fase i la constant de temps entre d'altres.

En la part superior de la finestra es poden regular dos paràmetres, el temps de resposta i el comportament transitori, per anar variant tota aquesta taula de paràmetres. Degut que els paràmetres proposats pel Simulink són adients per al nostre problema, s'accepten aquestes constants i es procedeix a fer el mateix procés amb l'altre controlador.

Com que el sistema és del tipus MIMO, en canviar les constants d'un controlador, aquest fet té un efecte sobre l'altre, i si es repeteix la sintonia del primer PI després d'haver fet la

del segon, el Simulink ofereix una parella de constants que s'ajusten millor al model.

Per aquest fet, aquest procés es repeteix diversos cops amb els dos controladors amb els llaços de control tancats, fins que es convergeix a un resultat final dels paràmetres dels dos controladors, com es pot observar en la Fig. 8.19. En aquest punt, s'agafen les constants determinades pel programa i es situen en els dos controladors.

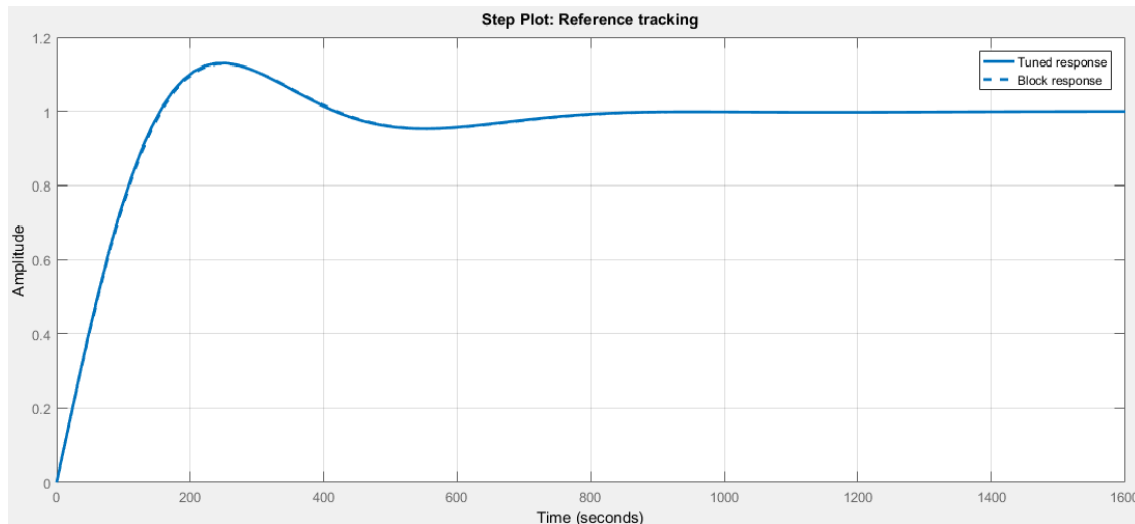


Fig. 8.19. Corbes de resposta després de diversos processos de tuning, on la corba contínua gairebé coincideix amb la discontinua.

Els valors de les constants obtingudes per als dos controladors es poden veure a la Taula 6.4, mentre que els paràmetres de les respostes es poden veure a les Fig. 8.21 i Fig. 8.22. Aquestes corresponen a un sistema de control descentralitzat diagonal segons l'esquema que es pot observar en la Fig. 8.20, la matriu del qual correspon a la matriu $K(s)$.

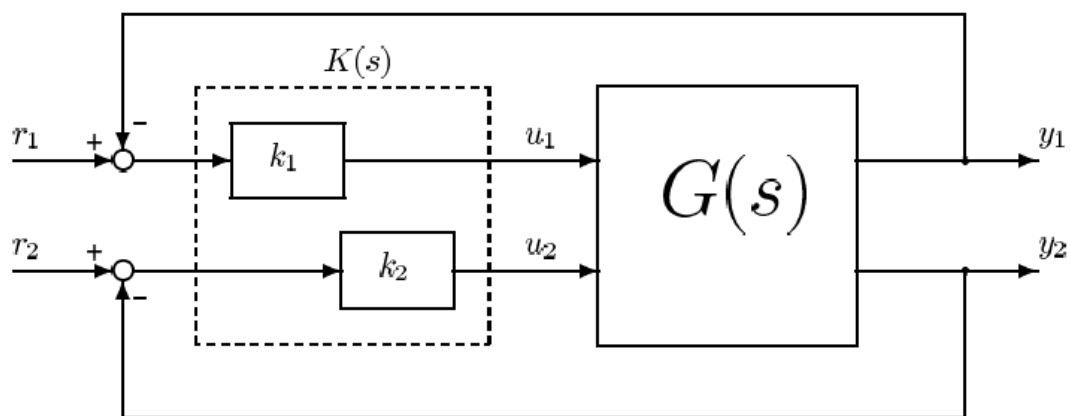


Fig. 8.20. Esquema d'un sistema MIMO 2x2 amb un sistema de control descentralitzat [29].

$$K(s) = \begin{pmatrix} k_1(s) & 0 \\ 0 & k_2(s) \end{pmatrix}$$

Sortida controlada	K_p	K_i
$k_1 - T_{pila}$	$7,83 \cdot 10^{-7}$	$9,11 \cdot 10^{-9}$
$k_2 - T_{hab}$	33,60	0,16

Taula 8.4. Constants dels dos controladors obtingudes amb el mètode d'assignació de pols de Simulink.

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	165 seconds
Settling time	790 seconds
Overshoot	7.34 %
Peak	1.07
Gain margin	231 dB @ 2.23e+04 rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.00909 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fig. 8.21. Paràmetres de resposta de T_{pila} .

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	117 seconds
Settling time	719 seconds
Overshoot	13 %
Peak	1.13
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.0125 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Fig. 8.22. Paràmetres de resposta de T_{hab} .

Es realitza una prova amb aquests valors i aplicant una pertorbació en la temperatura exterior, i la simulació finalitza sense cap problema i els valors estacionaris obtinguts són exactament els valors desitjats, per tant es pot dir que el sistema de control dona una bona resposta a aquesta pertorbació.

8.4. Anàlisi dels resultats de simulació en llaç tancat

Un cop es disposa d'uns llaços de control adequats, ja es pot sotmetre el model a un anàlisi de la resposta envers diverses pertorbacions que es poden donar en l'aplicació real. En aquest cas, les pertorbacions corresponen majoritàriament a canvis en la temperatura exterior o canvis en la temperatura desitjada de l'habitatge.

Per aquest fet, es determina un estat inicial que correspon a l'estat nominal del sistema, i s'apliquen pertorbacions en aquestes temperatures ja sigui per mitjà de graons (com s'ha fet en apartats anteriors), o per mitjà de perfils de temperatures si es vol analitzar la resposta al llarg d'un període determinat respecte un perfil de temperatures que es correspongui a la realitat.

El primer anàlisi que es creu interessant de realitzar és el que correspon a la resposta a pertorbacions en forma de graó en cadascuna de les dues temperatures separatament. Aquest anàlisi és necessari per determinar primer quin efecte tenen els petits canvis en les temperatures exterior i desitjada sobre les temperatures del sistema, i també per observar fins a quins valors de temperatura el sistema és capaç de donar una resposta adequada.

8.4.1. Resposta a una pertorbació en la temperatura exterior

El primer cas que es vol estudiar és la resposta que ofereixen els valors de les diferents temperatures del sistema a una pertorbació en la temperatura exterior. Per aquest fet, s'aplica un graó unitari negatiu en el segon 100 de simulació, fent disminuir la temperatura exterior de 284 a 283 K, i s'observen les representacions de les diferents temperatures. Es simulen un total de 1500 segons, temps al qual s'espera que el sistema hagi assolit el seu nou estacionari.

Observant la Fig. 8.23 es veu que aquest decrement en la temperatura té un efecte contrari en les dues temperatures més importants del sistema, suposant un decrement instantani de gairebé un grau en la temperatura de l'habitatge i en un increment no tant instantani d'entre 3 i 4 graus en la temperatura de la pila.

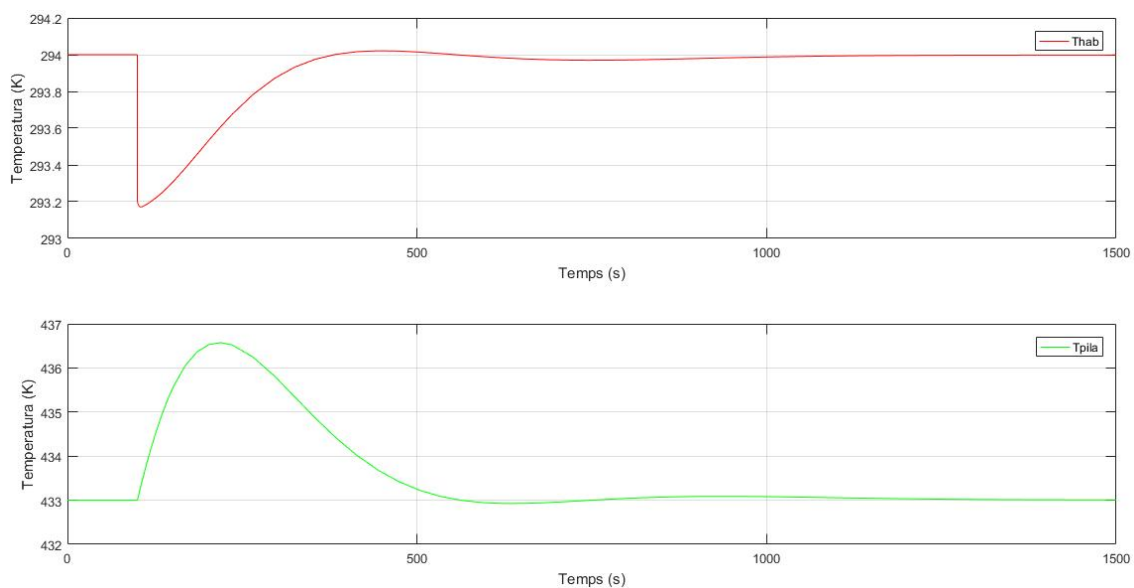


Fig. 8.23. Respostes de les temperatures de l'habitatge i de la pila a un graó unitari negatiu en la temperatura exterior.

Posteriorment a aquestes variacions, la resposta d'ambdues temperatures és molt similar, assolint valors estacionaris al voltant dels 400 segons de simulació, fet que implicaria que l'habitatge tardaria uns 5-8 minuts en assolir exactament la temperatura correcta si es produís aquesta pertorbació en la temperatura exterior.

L'efecte que té aquesta pertorbació és l'esperat, ja que una baixada de la temperatura exterior fa que augmentin les pèrdues en l'habitatge, fet que fa disminuir la temperatura de l'habitatge immediatament (no hi ha dinàmica en les pèrdues de l'habitatge). Aquesta baixada de la temperatura de l'habitatge fa augmentar el corrent amb l'ajuda del controlador, i aquest augment inicialment produeix un augment en la temperatura de la pila, que es corregeix amb un augment del cabal de refrigerant per part del controlador per fer que aquesta torni al valor nominal.

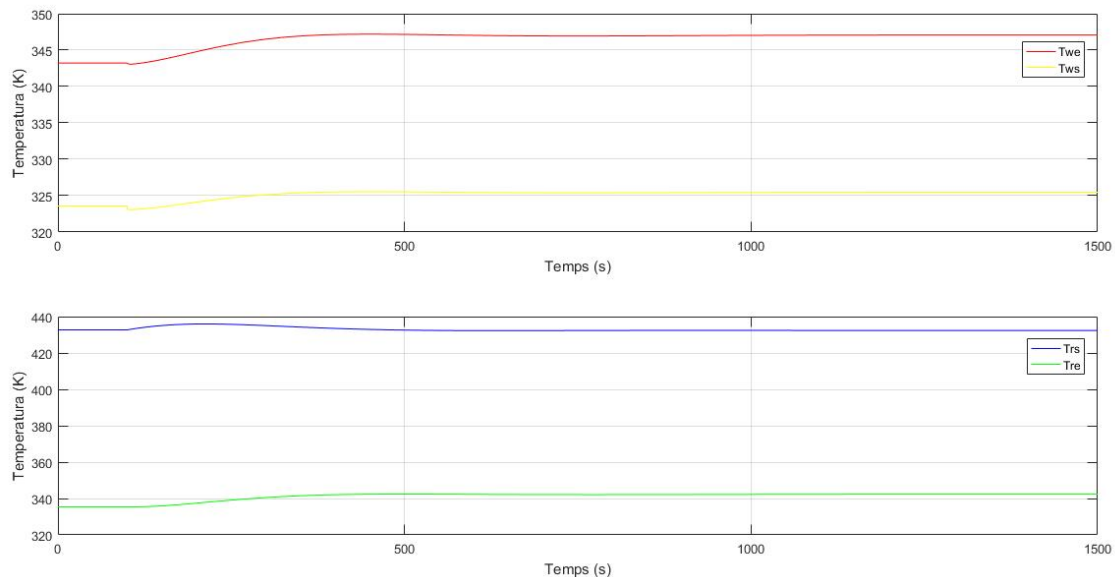


Fig. 8.24. Respostes de les temperatures de l'aigua de calefacció i refrigeració a un graó unitari negatiu en la temperatura exterior.

Pel que fa a les temperatures de l'aigua de calefacció, tant la d'entrada com la de sortida de la casa presenten una resposta inversa, amb una lleugera reducció del seu valor en aplicar la pertorbació i posteriorment amb un augment més elevat en la temperatura d'entrada que en la de sortida, però en els dos casos aquest augment és al voltant d'uns 3-4 graus. El temps que les temperatures tarden en assolir un valor estacionari és molt semblant al cas de l'habitatge, i sobre els 8-10 minuts aquestes ja no varien.

Finalment, pel que fa a les temperatures de l'aigua refrigerant, la temperatura d'entrada ofereix una resposta directa, al contrari que la de sortida, que és inversa. Aquest fet és degut que, com s'ha vist en apartats anteriors, la temperatura de sortida està molt lligada a la de la pila i, com que aquesta inicialment augmenta, també ho fa la de l'aigua. En passar uns 500 segons, aquesta temperatura ja torna a situar-se a un valor molt semblant a l'inicial però, com s'ha vist en l'apartat 8.1, aquesta és lleugerament per sota del valor inicial ja que hi ha hagut un augment del cabal, que fa que l'increment de temperatures entre l'entrada i la sortida sigui més petit.

En aquest cas, s'ha analitzat una pertorbació unitària negativa ja que és el cas que va en el sentit del punt crític de treball, però també s'ha observat la resposta en aplicar una pertorbació positiva, obtenint simplement uns resultats simètrics en tots els casos.

D'altra banda, s'ha volgut analitzar el comportament del sistema en situar la temperatura exterior en el punt crític, quan aquesta és de 279 K. Per aquest fet, es realitza una simulació amb un graó de 5 graus negatius en el segon 100 de simulació, situant el temps total de simulació en 8000 segons per assegurar que totes les temperatures assolixen l'estat estacionari.

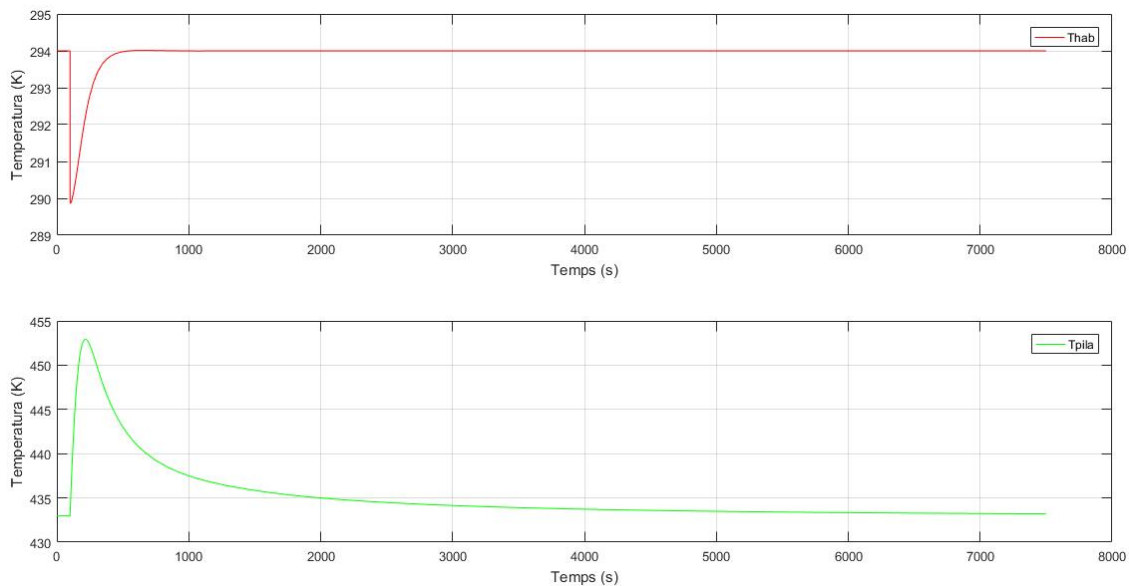


Fig. 8.25. Respostes de les temperatures de l'habitatge i de la pila a un graó crític negatiu en la temperatura exterior.

Com es pot observar en la Fig. 8.25, les temperatures de l'habitatge i de la pila presenten unes respostes molt semblants a les del graó unitari, però augmentant les seves amplituds degut a l'augment en l'amplitud del graó. Mentre que la temperatura de l'habitatge respon amb un temps molt semblant a l'anterior, la temperatura de la pila tarda un temps molt elevat en tornar a assolir el valor nominal de 433 K, fent-ho al voltant dels 5000 segons.

A part, aquesta temperatura sofreix un augment fins als 452 K, valor que està molt al límit del funcionament d'aquesta pila, i no és fins al cap de 1000 segons que aquesta torna a acostar-se a valors en què aquesta es pot considerar que es troba lluny de les temperatures límit de treball. Tot i així, en cap moment aquesta supera els límits i per tant, es considera que és capaç d'assolir el punt crític, ja que en la realitat mai es produeix un decrement brusc de 5 graus.

Respecte a l'aigua de calefacció i refrigeració, com ja s'ha vist en apartats anteriors, sofreix un decrement de la diferència entre l'entrada i la sortida, allunyant el valor de sortida del de la temperatura de la pila mentre que el d'entrada puja molt quantitativament (de fet, el punt nominal s'ha situat per que aquest punt tingui un increment d'uns 30 graus). La reducció d'aquest increment és el que limita el funcionament del sistema a temperatures exteriors més baixes, ja que aquest es torna nul i és incapaç d'extreure energia del sistema.

D'altra banda, la temperatura de l'aigua de calefacció és un factor que cal observar amb més profunditat ja que, segons s'ha mencionat anteriorment, les recomanacions dels fabricants de radiadors afirmen que cal que l'aigua d'entrada i sortida difereixin aproximadament 20 graus, mentre que la diferència entre la mitjana d'aquesta aigua i la temperatura de l'habitatge hauria d'estar sobre els 40 graus.

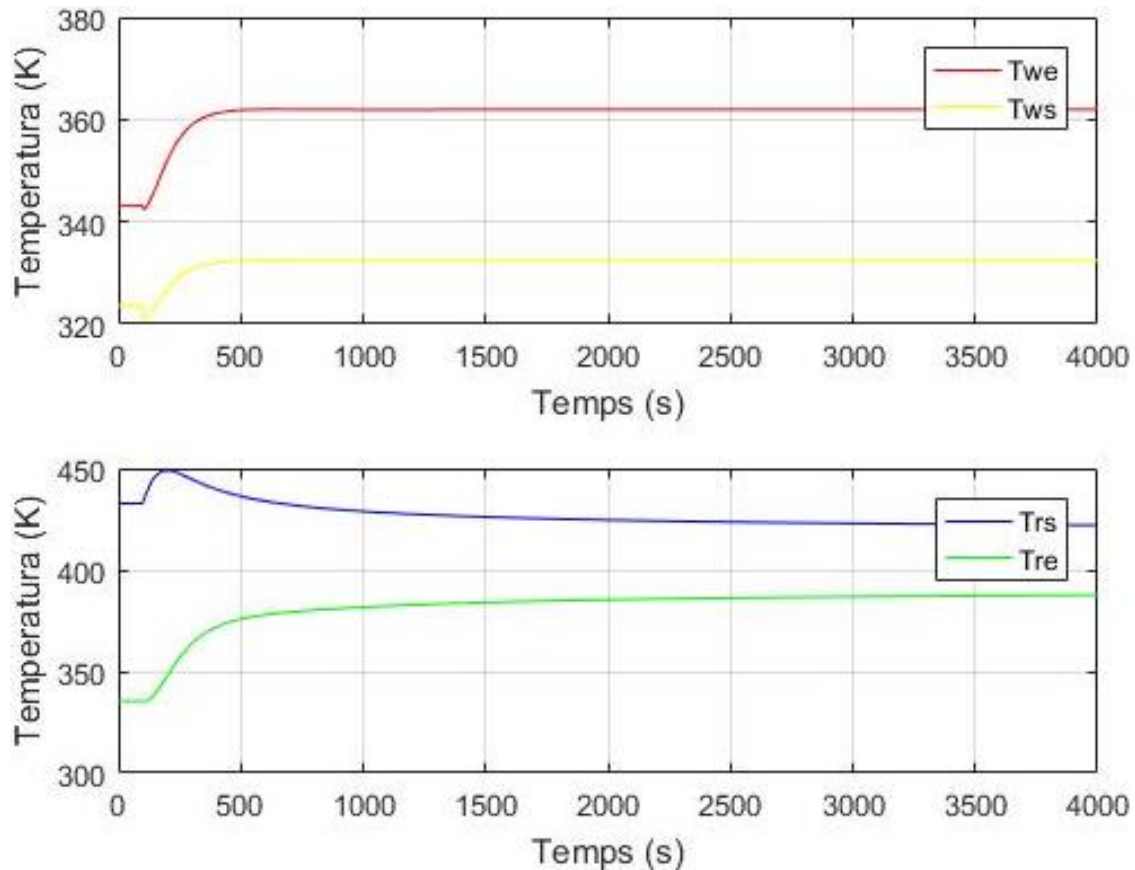


Fig. 8.26. Respostes de les temperatures de l'aigua de refrigeració i de calefacció a un graó crític negatiu en la temperatura exterior.

En aquest cas, l'entrada i la sortida tenen una diferència d'uns 30 graus (363 a l'entrada i 333 a la sortida), mentre que la diferència entre la temperatura mitjana de l'aigua i la temperatura de l'habitatge és d'uns 56 graus. Aquests valors són força distants dels recomanats, fet que es podia esperar tenint en compte que s'està treballant en un punt crític. Cal tenir en compte aquest fet a l'hora d'avaluar el sistema i la seva eficiència, però no es creu que sigui un fet de risc de cara al deteriorament d'aquest.

Per últim, es pretén analitzar el punt crític cap a l'altre sentit, és a dir quan la temperatura exterior és més elevada que en el punt nominal. En aquest cas, es pretén determinar fins a quina temperatura exterior el sistema és capaç de funcionar. Per això, es varia el valor fins que el sistema es torna inestable, fet que succeeix quan aquesta val 290 K. Aquest fet, però, no és un problema, ja que a una temperatura de 290 K, no es requereix un sistema de calefacció per escalfar un habitatge. La resposta de les temperatures de l'habitatge i la pila quan aquesta es situa al valor de 289 K es pot veure en la figura Fig. 8.27.

En aquest cas, les respostes presenten una oscil·lació molt remarcada, amb un augment inicial de la temperatura de l'habitatge fins els 298 K per després tornar al valor nominal al cap d'uns 700 segons, però baixant en un instant fins a gairebé 293 K en el sobrepuig. Pel que fa a la temperatura de la pila, presenta una resposta contrària a la de l'habitatge,

baixant inicialment fins als 415 K, valor que està bastant per sota del punt de funcionament, però que ràpidament retorna al voltant de la temperatura nominal, pujant però fins a gairebé 440 K en el sobrepuig, per assolir també la temperatura estacionària sobre els 700 segons.

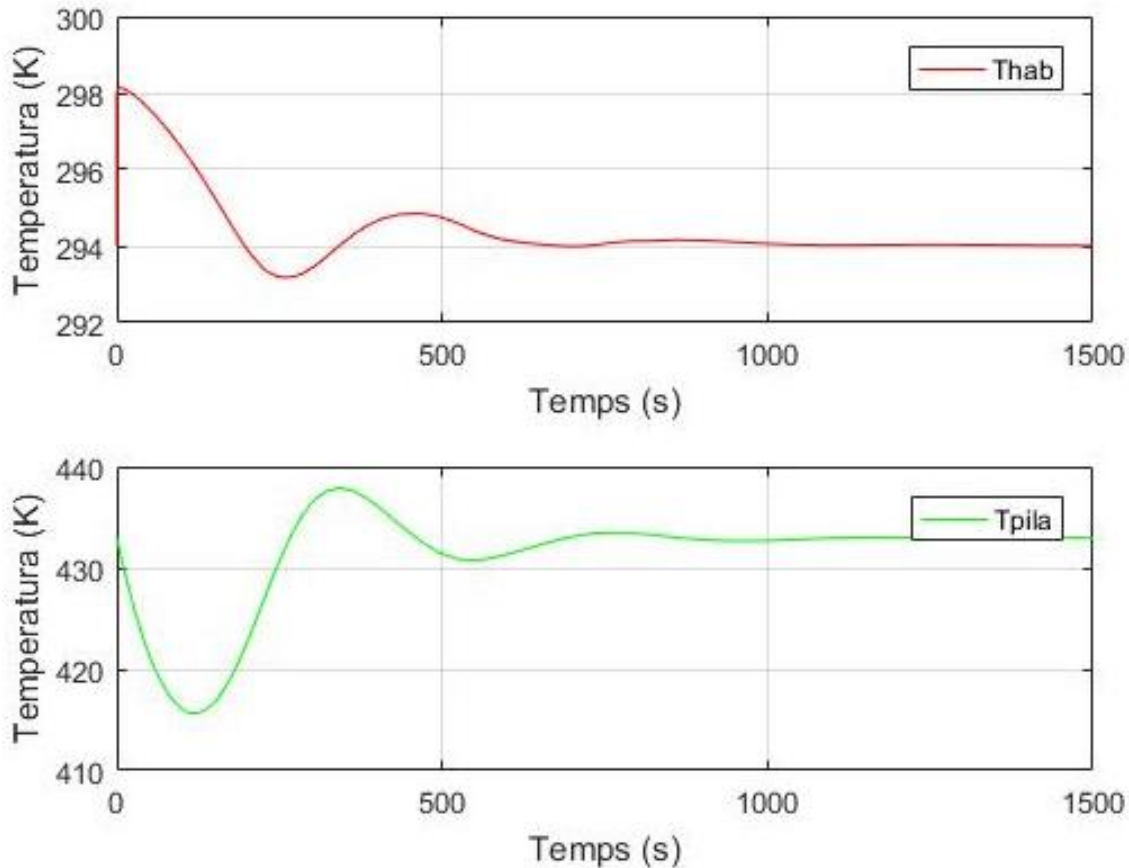


Fig. 8.27. Respostes de les temperatures de l'habitatge i de la pila a un graó crític positiu en la temperatura exterior.

Pel que fa a les temperatures de les aigües, la de refrigeració segueix la seva tendència d'augmentar l'increment entre l'entrada i la sortida de la pila, mentre que per al cas de la temperatura de l'aigua de calefacció, l'increment es redueix fins a una diferència d'uns 10 graus entre l'entrada i la sortida, i amb una diferència entre l'aigua i la de l'habitatge d'uns 25 graus (els increments varien cap al sentit contrari que amb la pertorbació crítica negativa). En ambdós temperatures es produeix una oscil·lació força marcada al voltant del punt estacionari.

Cal dir, però, que les variacions crítiques tant brusques en la temperatura exterior no són situacions reals, ja que en la situació real la variació es produeix progressivament, i en aquest cas no s'assolirien temperatures tant crítiques, sobretot en la temperatura de la pila. Això implica que la freqüència de canvi de les entrades del sistema és baixa (canvis lents de temperatura), fet que permet justificar l'aparellament dels controladors realitzat com s'ha vist anteriorment.

8.4.2. Resposta a una pertorbació en la temperatura desitjada (setpoint)

En segon lloc, es vol estudiar quina és la resposta de les diferents temperatures del sistema en aplicar una pertorbació en la temperatura desitjada en l'habitatge, que en l'estat nominal està situada a 294 K d'acord amb les recomanacions de les autoritats, però que en alguns casos pot variar. Per aquest fet, s'aplica un graó unitari positiu, ja que aquest sentit és el que exigeix una quantitat de potència superior a la nominal. Aquest s'aplica en el segon 100 de simulació, d'un total de 1500 segons.

Observant la Fig. 8.28, s'observa que la resposta de la temperatura de l'habitatge inicialment té una resposta diferent que en l'estudi anterior, i la temperatura no augmenta bruscament, sinó que ho fa amb una resposta directa que, en canvi, sí que té un temps de resposta molt semblant al del cas anterior, situant-se la temperatura de l'habitatge en la nova temperatura desitjada al cap d'uns 3-4 minuts des de la pertorbació, oscil·lant lleugerament al voltant d'aquest valor fins a establir-se totalment al cap d'uns 15 minuts.

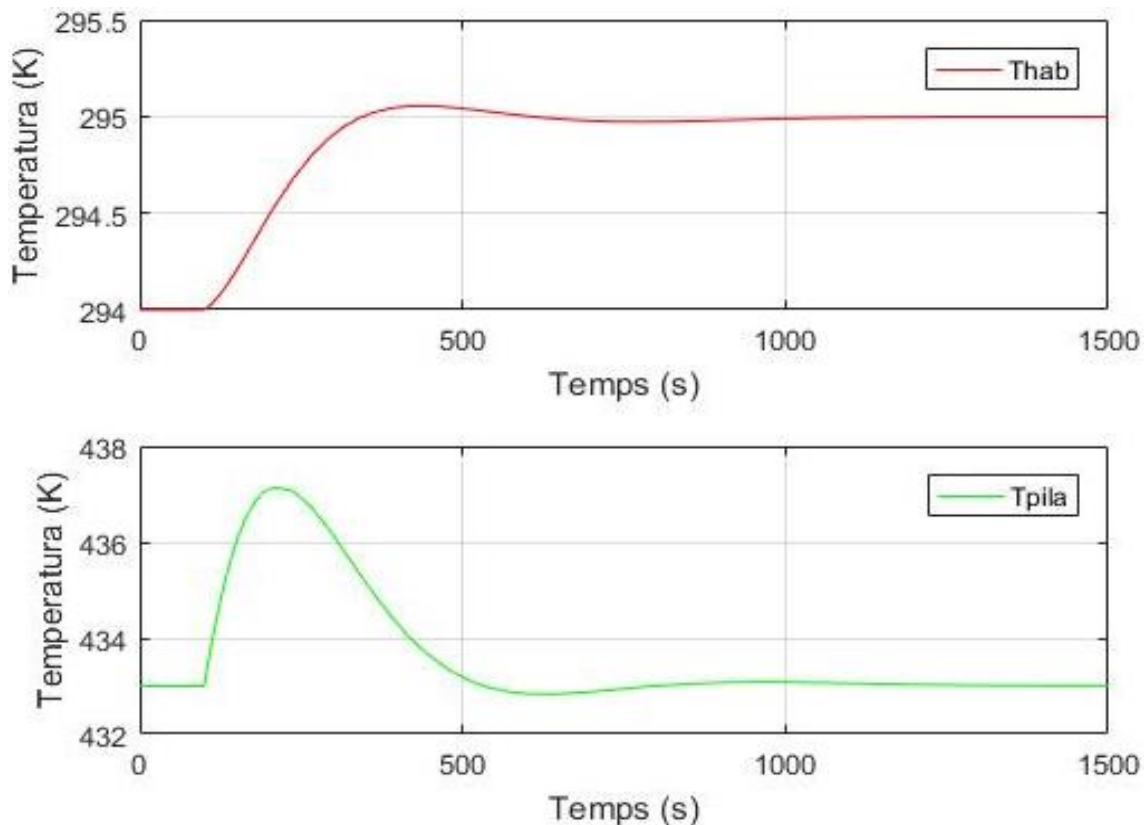


Fig. 8.28. Respostes de les temperatures de l'habitatge i de la pila a un graó unitari positiu en el setpoint de la temperatura de l'habitatge.

D'altra banda, pel que fa a la temperatura de la pila, aquesta té una resposta igual al cas anterior, amb un augment d'uns 4 graus aproximadament en l'inici, i retornant posteriorment a la temperatura nominal de 433 K a la qual s'arriba al voltant d'uns 7-8 minuts després, amb una lleugera oscil·lació al voltant d'aquest punt.

Els dos efectes observats són els esperats, ja que un augment en el valor del setpoint fa augmentar el corrent de la pila mitjançant el controlador, que al seu temps fa augmentar la temperatura de la pila i aquest fet es corregeix amb l'altre controlador mitjançant un augment del cabal de refrigerant que retorna la temperatura de la pila al valor adequat.

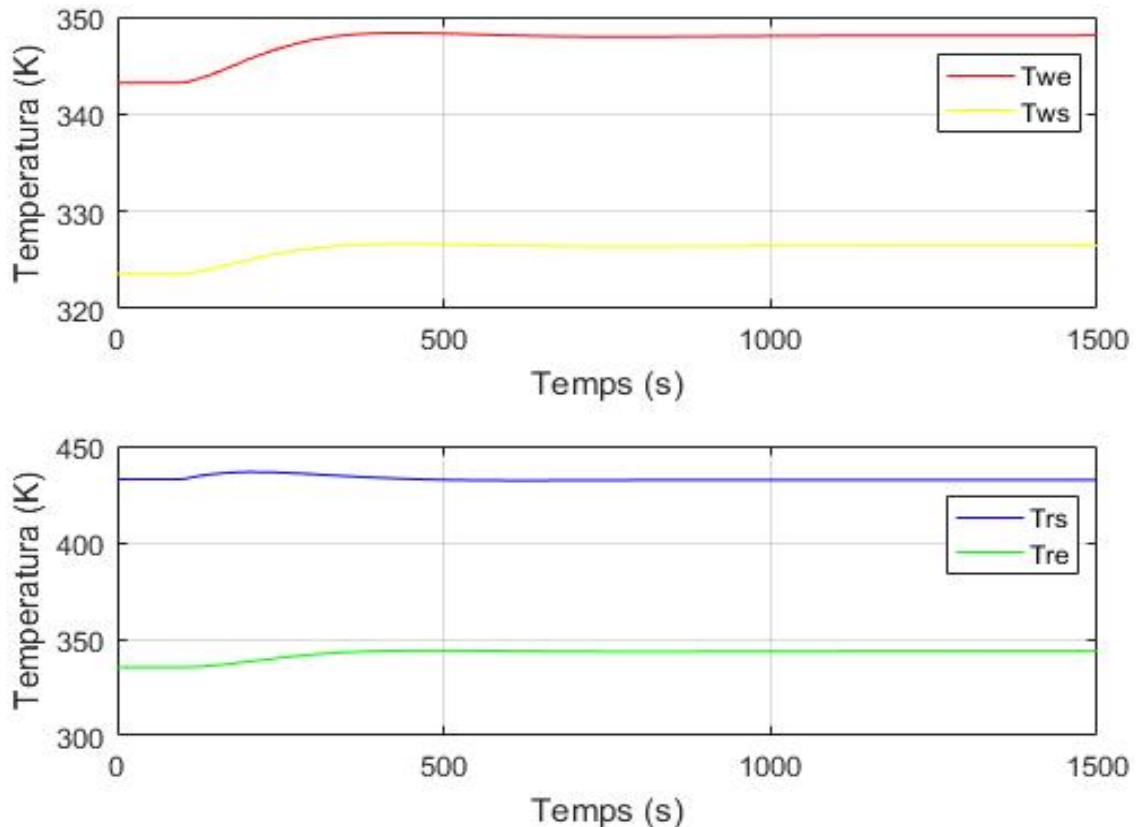


Fig. 8.29. Respostes de les temperatures de l'aigua de calefacció i refrigeració a un graó unitari positiu en el setpoint de la temperatura de l'habitatge.

Pel que fa a les temperatures de les aigües, ambdues tenen una resposta idèntica que per la pertorbació en la temperatura exterior, amb un augment de les temperatures de l'aigua de calefacció d'uns 3-4 graus i una reducció de la diferència entre entrada i sortida en la temperatura del refrigerant.

Com en l'estudi anterior, cal estudiar quins són els punts crítics del valor d'aquest setpoint de la temperatura de l'habitatge, aplicant pertorbacions cap als dos sentits. Aquest estudi és vàlid per determinar fins a quin valor de temperatura es pot demanar al sistema amb una resposta correcta, i també a partir de quin valor de temperatura desitjada aquesta és massa propera a la temperatura exterior i el sistema és inestable, ja que la potència que cal subministrar és molt baixa.

Per estudiar el valor crític en el sentit positiu del setpoint, es creu que aquest hauria de coincidir amb el valor que presenti la mateixa diferència amb la temperatura de l'exterior que en l'estudi anterior, és a dir 15 graus. Per aquest fet, es considera per realitzar la primera prova que el valor crític correspon a 299 K per una temperatura de 284 K en

l'exterior.

En realitzar la simulació, s'observa que amb el setpoint a 299 K, la diferència de la temperatura de l'aigua refrigerant entre l'entrada i la sortida és gairebé nul·la, i que la temperatura de la pila en estacionari és de 435, dos graus per sobre de la temperatura nominal. Per aquest fet, es considera que el sistema no pot assolir una temperatura en l'habitació de 299 K, i es procedeix a realitzar la prova amb 298 K.

Amb aquest canvi, s'aprecia com el sistema si que és capaç de subministrar la potència suficient per tal que l'habitatge assoleixi els 298 K sense que la pila es sobreescalfi, a una velocitat força elevada, ja que menys de 5 minuts després de la pertorbació, el sistema ja ha assolit la temperatura desitjada, igual que en el cas de la pertorbació unitària, fet que sembla indicar que la velocitat és independent de l'amplitud de la pertorbació.

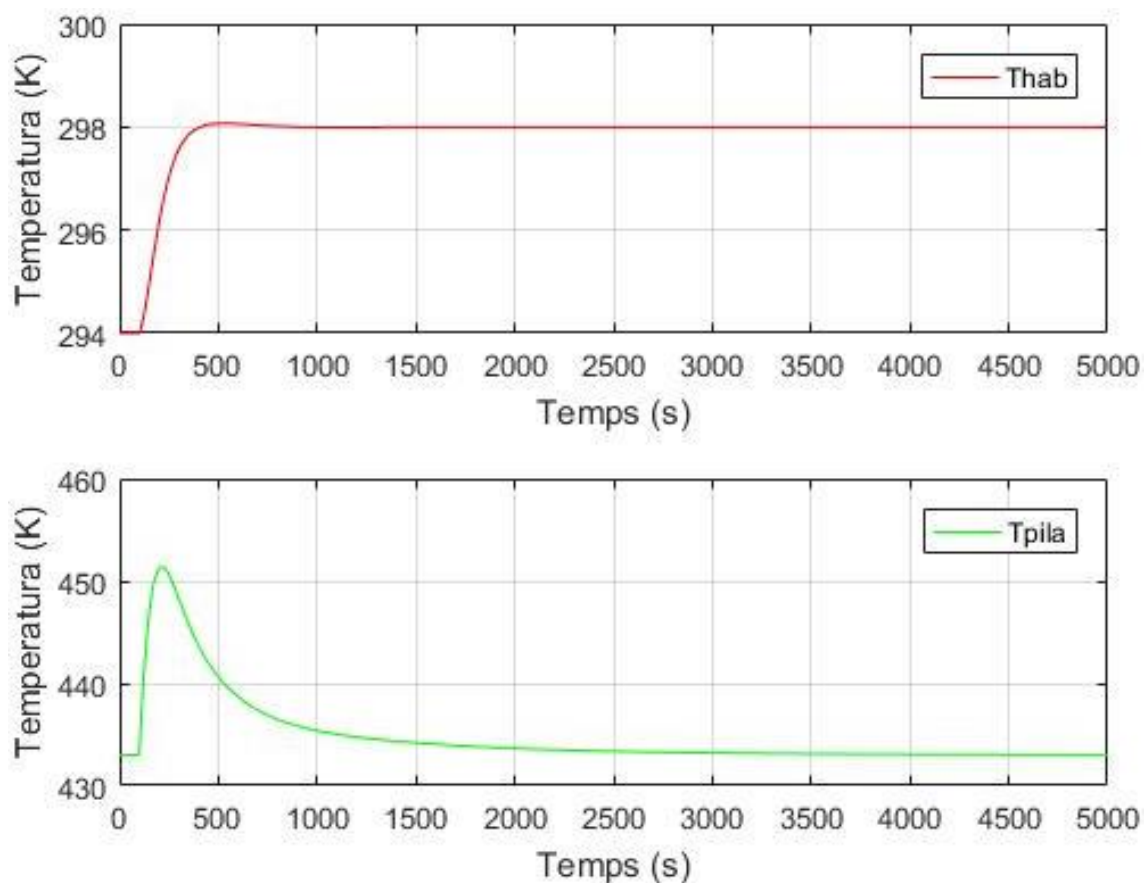


Fig. 8.30. Respostes de les temperatures de l'habitatge i de la pila a un graó crític positiu en el setpoint de la temperatura de l'habitatge.

D'altra banda, pel que fa a la temperatura de la pila, aquesta es comporta molt semblant al punt crític de la temperatura exterior, amb un augment brusc fins a una temperatura superior als 450 graus, molt propera al límit de funcionament, i posteriorment un descens cap a la temperatura nominal, que assoleix al cap d'uns 40 minuts després. Tot i així, cal dir que uns 5-6 minuts després de la pertorbació, la temperatura ja es troba per sota dels 440 K i per tant, s'allunya ràpidament de valors crítics.

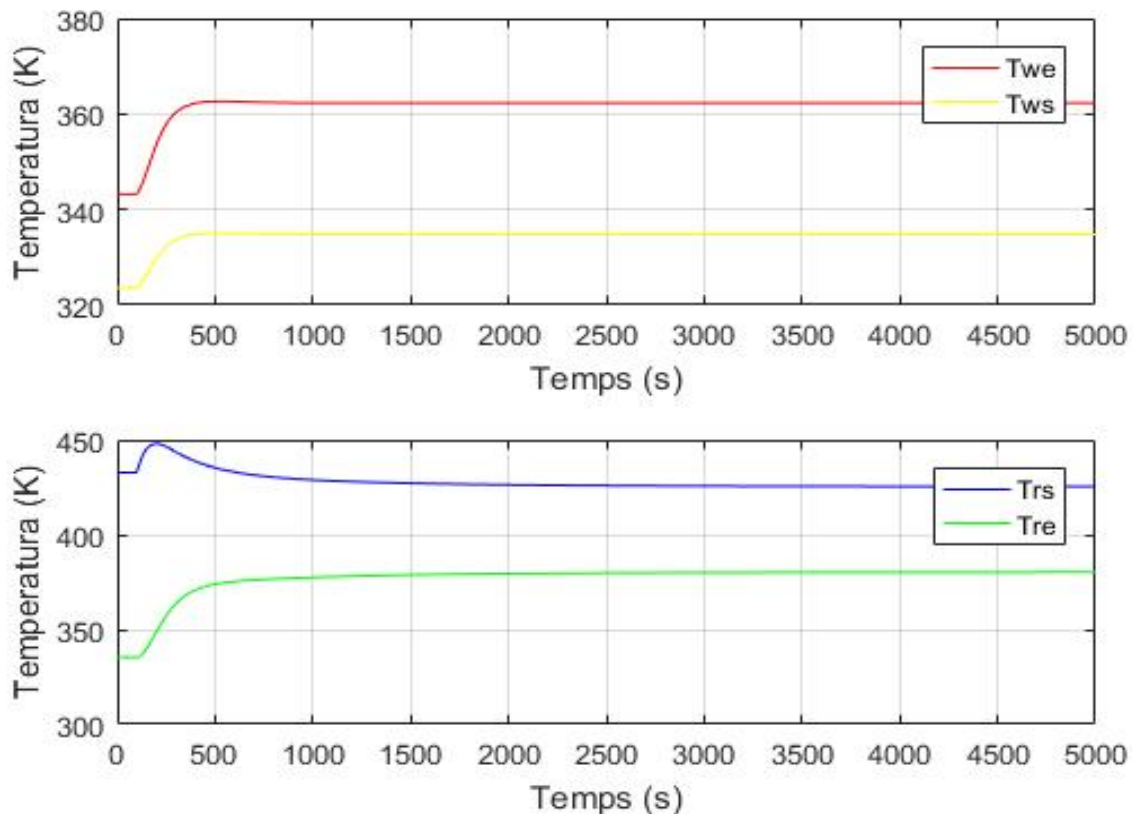


Fig. 8.31. Respostes de les temperatures de l'aigua de calefacció i refrigeració a un graó crític positiu en el setpoint de la temperatura de l'habitatge.

Per assolir aquest valor crític de temperatura en l'habitatge, les temperatures dels líquids sofreixen canvis molt semblants als que es poden observar en el punt crític de la temperatura exterior. En aquest cas, la temperatura de l'aigua de calefacció es situa en uns valors que deixen uns increments de temperatura molt semblants que en el punt crític anterior, i que no són els correctes per al funcionament del sistema de radiadors.

La temperatura del refrigerant té una resposta també mot igual al cas anterior, amb una reducció de l'increment de temperatures, que allunya la de sortida de la temperatura de la pila, i situa l'increment en aquest cas en uns 45 graus, una mica superior que en el cas anterior (ja que la potència que s'està transmetent és lleugerament inferior degut que hi ha un grau menys de diferència entre la T_{hab} i la T_{amb}).

Finalment, en el cas de la pertorbació crítica en el sentit negatiu, es dona una resposta molt semblant al cas anterior per a un valor de setpoint de 290 K, encara que el sistema és capaç de realitzar simulacions fins al valor de 289 K. Com es pot veure en les figures, el sistema oscil·la molt al voltant de la temperatura estacionària, i la pila assoleix en alguns punts valors per sota dels 415 K, temperatura molt baixa respecte a la nominal.

La temperatura de l'habitatge té una resposta que indica que s'està treballant a valors propers a la inestabilitat amb una petita variació al voltant del segon 1250, però tot i així aconsegueix la temperatura desitjada. Pel que fa a les temperatures de les aigües també

passa com en l'estudi anterior, amb la de calefacció assolint un increment més petit del nominal i a temperatures més baixes, i amb la de refrigeració ampliant encara més el seu increment de temperatures.

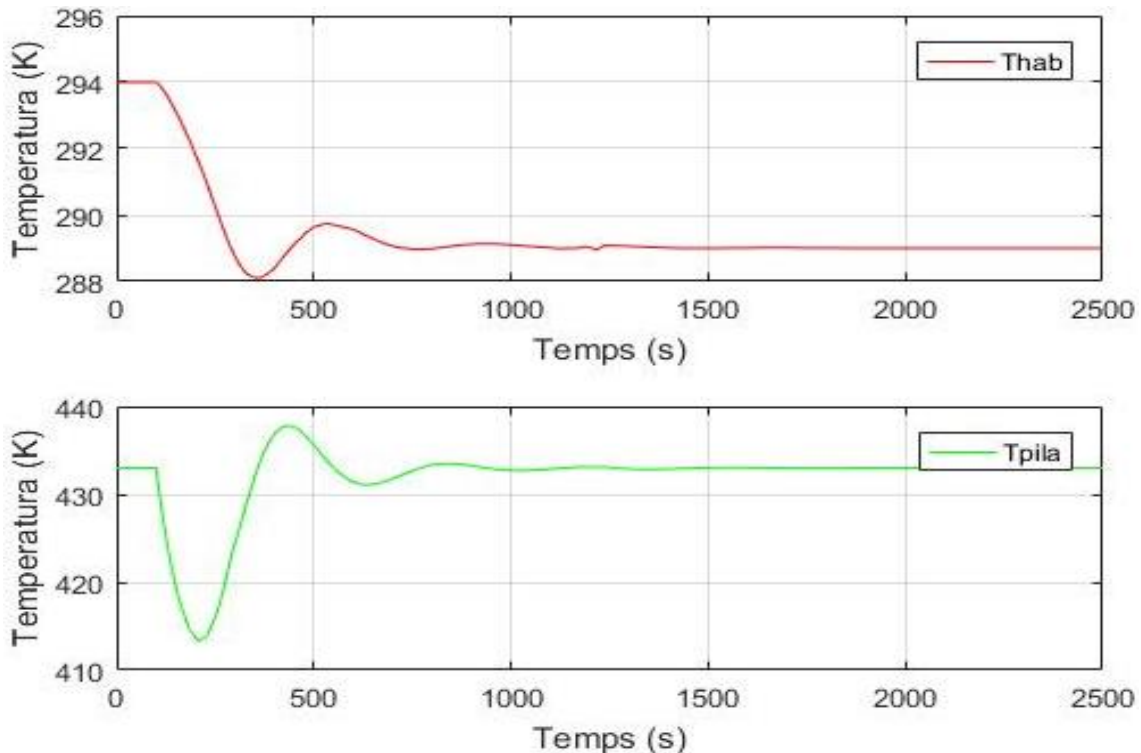


Fig. 8.32. Respostes de les temperatures de l'habitatge i de la pila a un graó crític negatiu en el setpoint de la temperatura de l'habitatge.

En aquest cas, el canvi crític tant brusc en la temperatura de setpoint si que és real, ja que no és una situació estranya que l'usuari del sistema de calefacció vulgui situar instantàniament aquesta temperatura per sobre o per sota de la nominal. Per aquest fet, es realitza un estudi final que correspon a la simulació d'un dia sencer de funcionament aplicant perfils de temperatura que combinin pertorbacions en les dues temperatures que s'han estudiat, aplicant perfils amb canvis progressius en la temperatura exterior i amb canvis bruscos en el setpoint de la temperatura de l'habitatge.

8.4.3. Resposta a una perfil de temperatures exterior i de setpoint de l'habitatge

Per tal de sotmetre el sistema a un cas real s'apliquen dos perfils de temperatura, un en la temperatura exterior i un en la temperatura de setpoint de l'habitatge. El primer, està dissenyat per emular els canvis de temperatura que es produeixen en l'ambient en un dia mitjà del més de gener, el més fred de l'any. El segon, en canvi, està dissenyat per situar el setpoint en 294 K des de les 8 del matí fins les 24 de la nit, i en 290 en el temps comprès entre la mitjanit i les 8 del matí, període en què es considera que els usuaris dormen i en què les autoritats recomanen baixar la temperatura de l'habitatge als 290 K.

Es realitza una simulació amb una duració d'un dia (86400 segons), situant els perfils observats en la figura Fig. 8.33. El perfil del setpoint de la temperatura de l'habitatge consisteix en un graó negatiu de 4 graus situat en el segon 28.800 de simulació, mentre que el perfil de la temperatura exterior es dissenya amb dues rampes, una amb pendent positiu i una amb negatiu.

La temperatura exterior oscil·la entre 279 K en el punt més fred i 287 en el punt més calent, valors mitjans de temperatura màxima i mínima del mes de gener a Barcelona. El valor inicial correspon a les 4 de la matinada, mentre que el punt de màxima temperatura es situa entre les 12 i les 13 del migdia.

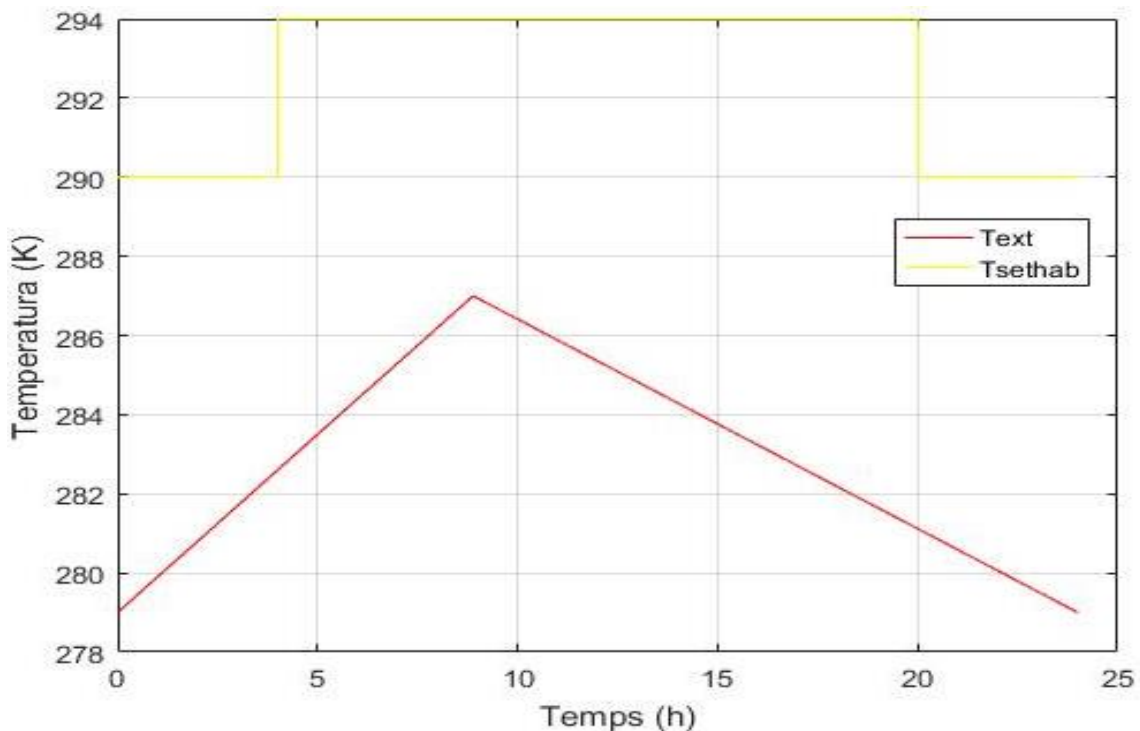


Fig. 8.33. Perfils de temperatura aplicats a la temperatura de setpoint de l'habitació i a la temperatura exterior.

La temperatura de l'habitatge, tenint en compte els perfils aplicats, es manté inicialment en un valor constant lleugerament superior als 290 K. A les 4 hores de simulació, quan s'aplica el graó del setpoint de la temperatura de l'habitatge, aquesta varia molt ràpidament i es situa lleugerament per sobre dels 294 K desitjats en qüestió d'uns 5 minuts.

Després d'una lleugera oscil·lació al voltant d'aquest punt, es manté en aquest valor fins el canvi de pendent de la temperatura exterior, corresponent a unes 9 hores de simulació, on la temperatura baixa als 294 K. En aplicar el segon graó en la temperatura de setpoint, la de l'habitació baixa un altre cop fins els 290 K desitjats, amb una prèvia oscil·lació amb un sobrepuig d'un grau i estabilitzant-se en el valor al cap d'uns 15 minuts.

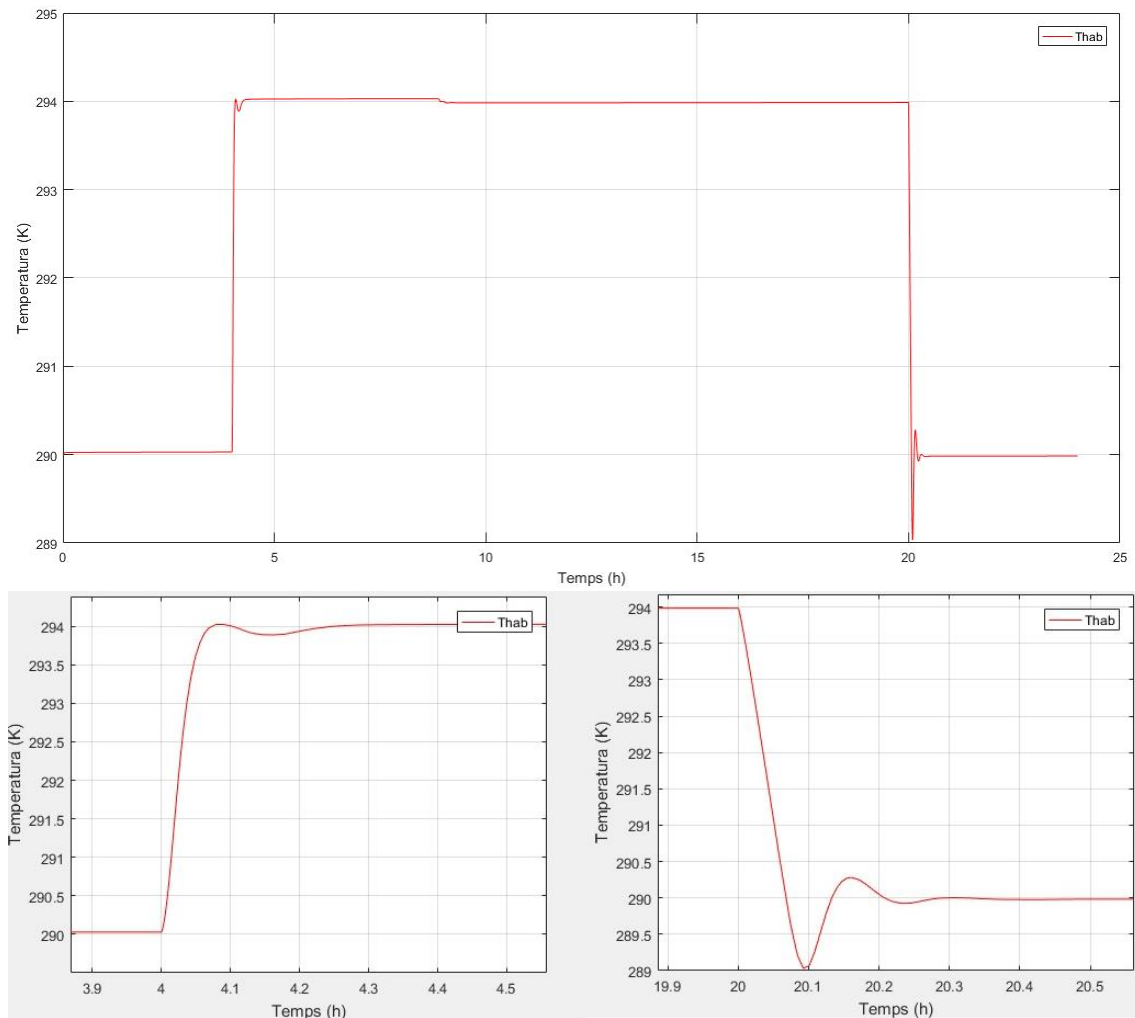


Fig. 8.34. Resposta de la temperatura de l'habitatge als perfils aplicats.

Pel que fa a la temperatura de la pila, aquesta comença inicialment en la temperatura nominal de funcionament, i en aplicar el graó a les 4 hores, aquesta sofreix un augment molt elevat, corresponent a un canvi de 13 graus en qüestió d'un minut, per baixar posteriorment un altre cop als 433 nominals al cap d'uns 5 minuts, amb una oscil·lació posterior al voltant d'aquest punt amb un sobrepuig d'un grau.

A partir d'aquí, la temperatura també sofreix un petit canvi en el punt del canvi de pendent, però és molt poc significatiu, i no és fins el segon graó de temperatura on aquesta sofreix un descens fins als 415 K, temperatura molt per sota de la de funcionament, però de la qual aconsegueix recuperar-se en qüestió de 5 minuts. Aleshores, aquesta pateix una oscil·lació sobre el punt nominal amb un sobrepuig d'uns 5 graus, fins que es situa en el valor nominal fins al final.

Els pics observats en els punts on s'apliquen els graons poden ser problemàtics ja que són molt elevats, però aquest fet es podria solucionar aplicant un filtre en el graó d'entrada que el suavitzi per obtenir una resposta menys agressiva.

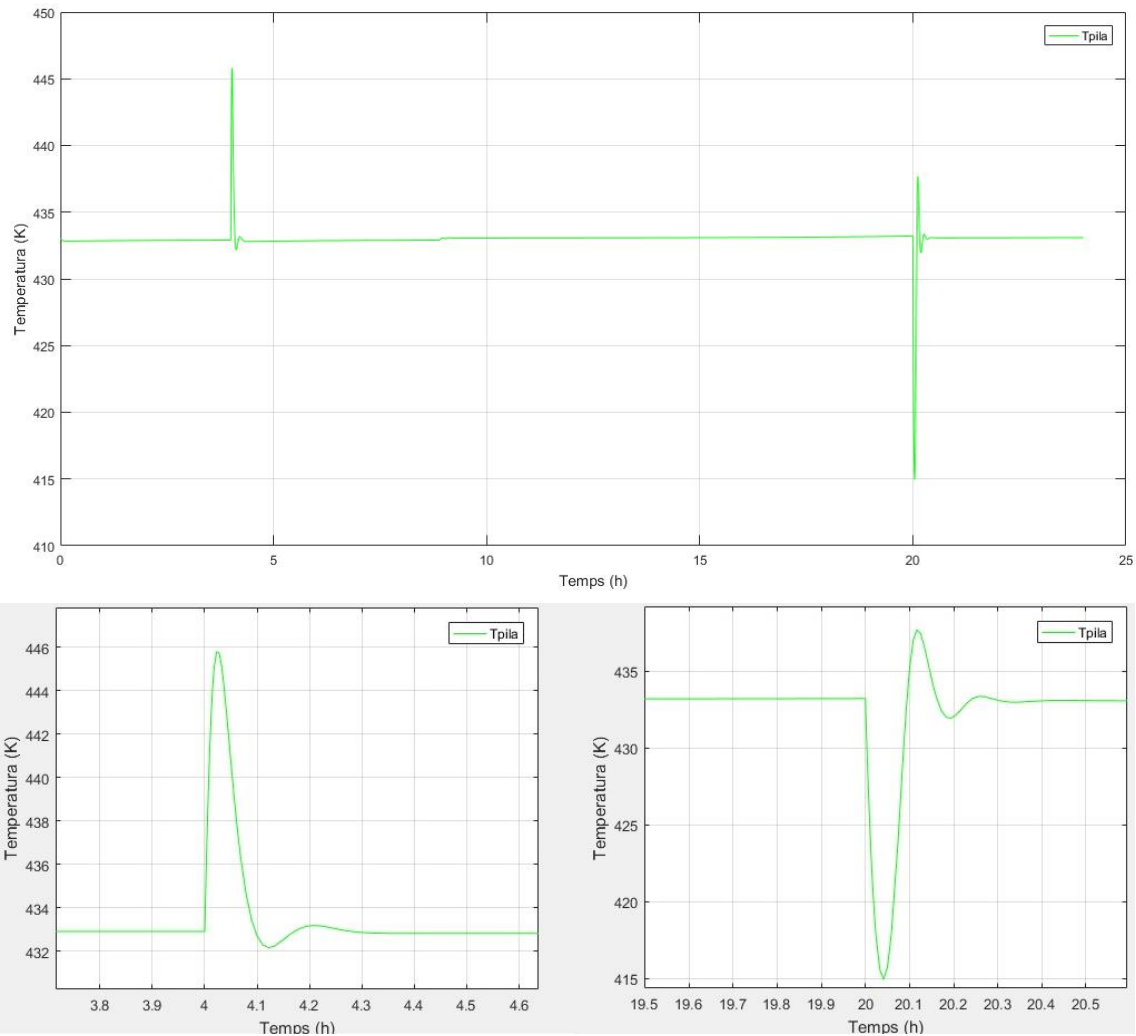


Fig. 8.35. Resposta de la temperatura de la pila als perfils aplicats.

Un altre aspecte interessant d'observar és l'evolució de les temperatures de les aigües, ja que cal veure com aquestes responen als perfils per tal de poder mantenir la temperatura de l'habitació i la pila constant.

Pel que fa a les aigües, la de calefacció comença amb un increment entre l'entrada i la sortida de 20 graus, corresponent a les temperatures inicials de 343 i 323 K, i a partir d'aquí aquestes descendeixen linealment fins les 4 hores, on l'increment correspon a 15 graus. En aquest punt s'aplica el graó en la temperatura desitjada de la casa, i en qüestió de 3 minuts les temperatures es situen en 349 i 327 K, amb un increment lleugerament superior als 20 graus.

A partir d'aquí, ambdues temperatures segueixen descendent fins el punt on el pendent de la temperatura exterior canvia de negatiu a positiu. En aquest punt, l'increment ha disminuït fins lleugerament per sota dels 15 graus, amb unes temperatures de 331 i 317 K. Aleshores, les temperatures comencen a augmentar linealment, fins que s'aplica el segon graó, on l'increment és d'uns 25 graus i les temperatures són de 353 i 329 K, i el graó les redueix a 336 i 319 K, amb una oscil·lació al voltant d'aquests punts força

marcada i amb un sobrepuig d'uns 5 graus. Des d'aquest punt, les temperatures segueixen augmentant fins la situació final, on aquestes es tornen a situar als 343 i 323 K inicials.

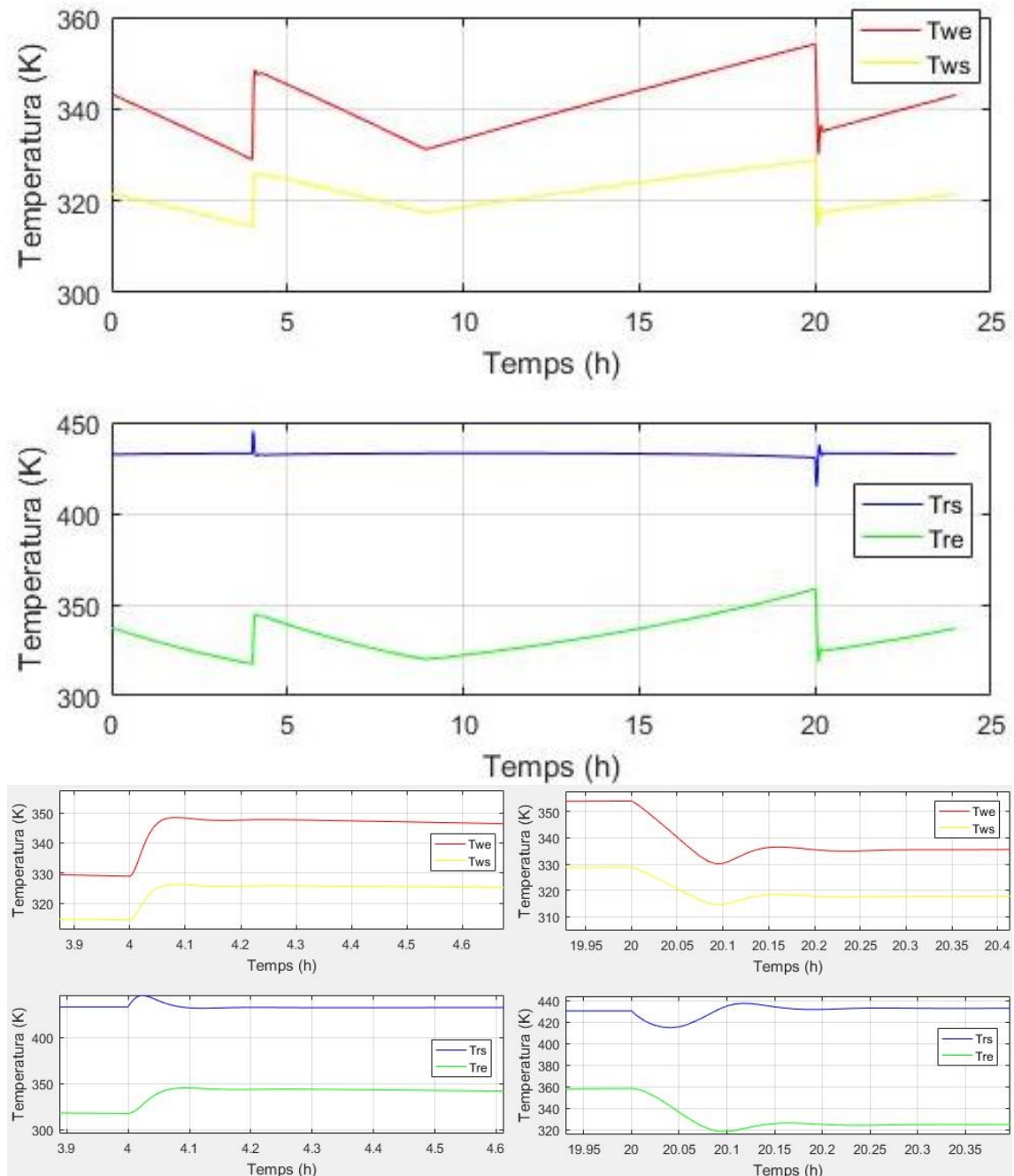


Fig. 8.36. Resposta de les temperatures de les aigües de calefacció i refrigeració als perfils aplicats.

D'altra banda, l'aigua de refrigeració té un comportament molt semblant pel que fa a l'aigua d'entrada a la pila, mentre que la de sortida es comporta molt semblant a la pila. Inicialment, la temperatura d'entrada també descendeix de forma lineal fins que s'aplica el graó, que la fa augmentar en uns 3 minuts. Aquest graó fa un efecte diferent sobre l'altra temperatura, que respon de la mateixa manera que la pila, augmentant la seva

temperatura i tornant a la temperatura nominal.

A partir d'aquest punt, la temperatura de l'aigua d'entrada segueix baixant fins el punt del canvi de pendent, on aquesta també el canvia i comença a augmentar. Això succeeix fins el punt on s'aplica el segon graó, que la fa descendir també de forma molt ràpida. L'altre temperatura, però, respon també de forma diferent, reduint inicialment el seu valor per tornar al valor nominal amb una prèvia oscil·lació. Finalment, la temperatura d'entrada segueix pujant de forma lineal fins assolir el valor inicial.

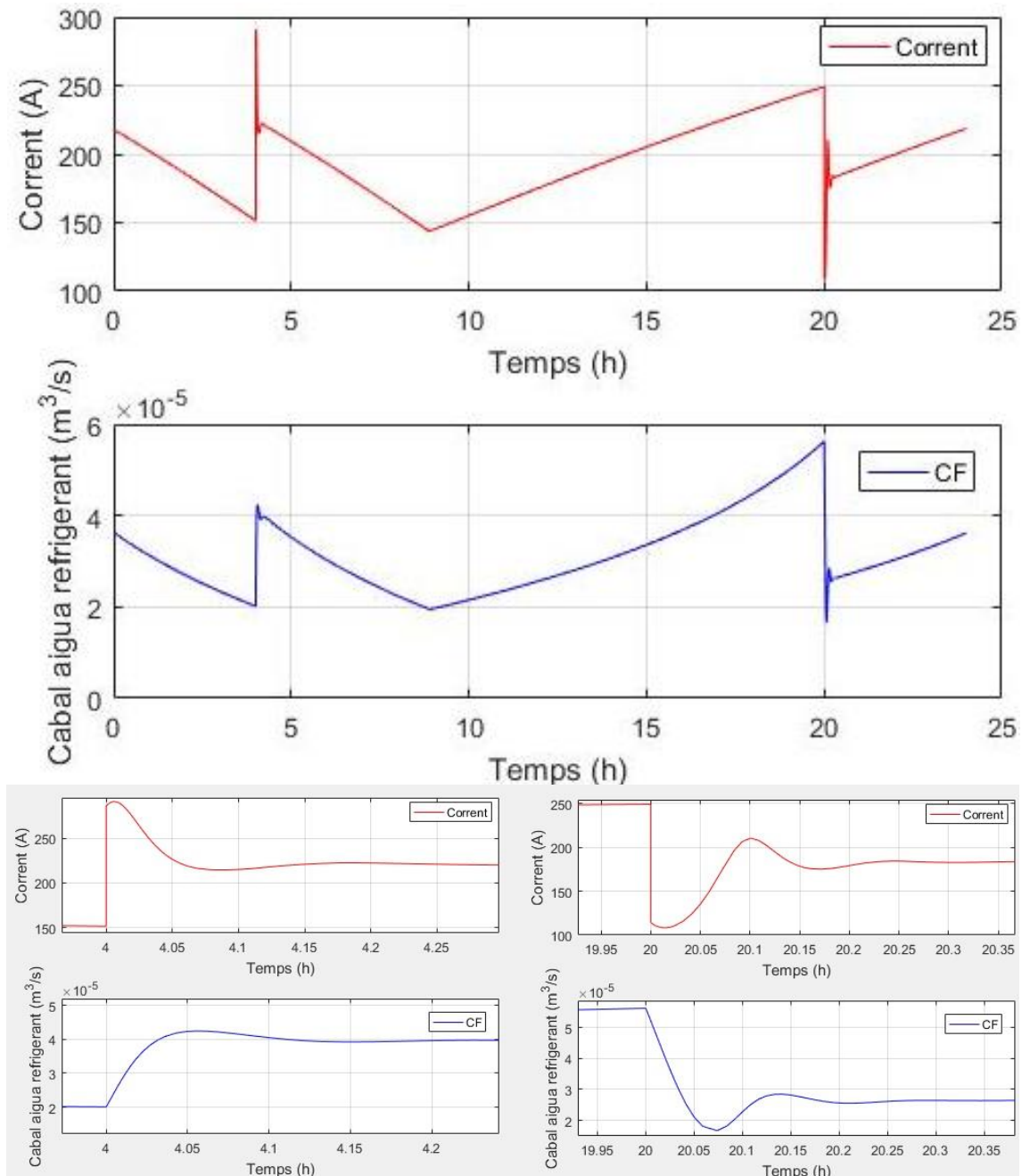


Fig. 8.37. Resposta de les entrades regulades pels controladors (corrent i cabal d'aigua refrigerant) als perfils aplicats.

Un cop s'ha estudiat el comportament de les temperatures de les aigües, es vol estudiar com els controladors han regulat els valors de les entrades del sistema per mantenir les temperatures de l'habitatge i de la pila en els valors adequats. És per això que es representa el comportament d'aquests valors al llarg de la simulació en la Fig. 8.37.

El comportament de les entrades és molt semblant al de les aigües. De fet, el valor d'aquestes és bastant determinant per al valor de les aigües i és per això que estan tant relacionats. Inicialment, el corrent comença al voltant dels 220 A, i decreix de manera lineal fins el valor de 150 A al cap de 4 hores, on se li aplica el graó en la temperatura de setpoint de l'habitatge.

Per solucionar aquest augment de temperatura, el controlador augmenta el valor d'aquest corrent instantàniament fins el valor de 285 A, per després oscil·lar al voltant dels 220 A, i seguir decreixent linealment fins el punt del canvi de pendent en la temperatura exterior, on el corrent es troba a un valor de 145 A.

A partir d'aquí, el corrent comença a augmentar linealment fins el punt on s'aplica el segon graó de la temperatura de setpoint de l'habitatge, on el corrent es troba a 250 A i el controlador el fa baixar immediatament a 110 A, per després oscil·lar sobre els 180 A amb un sobrepuig de fins a 25 A. Finalment, aquest valor s'estabilitza al cap d'uns 10-15 minuts i segueix creixent linealment fins el valor de 220 A inicial.

Pels valors observats del corrent, cal determinar si aquest en algun moment genera una densitat que es troba fora del rang del qual es disposa de les dades de comportament. Els valors màxim i mínim de corrent corresponen a 285 i 110 A respectivament, valors que corresponen a una densitat de corrent de 712,5 i 274 mA·cm⁻² per una àrea activa de 400 cm², i que es troben dins el rang del gràfic del qual es disposa.

D'altra banda, pel que fa al cabal d'aigua refrigerant, aquest té un comportament molt semblant també a les últimes variables estudiades però amb la diferència que els seus creixements i decreixements no es realitzen de forma lineal, sinó que tenen més aviat una lleugera forma corba, encara que molt semblants a una recta. Així, aquest valor inicialment correspon a 3,6·10⁻⁵ m³·s⁻¹, i decreix amb forma de corba fins que s'aplica el graó de les 4 hores, on el valor d'aquest cabal és de 2·10⁻⁵ m³·s⁻¹.

En aquest punt, per corregir l'augment de la temperatura de la pila, el controlador augmenta el valor d'aquest cabal, que té un comportament molt semblant al de la resta de variables. El punt mínim assolit per aquest és lleugerament inferior a 2·10⁻⁵ m³·s⁻¹, mentre que el màxim és de 5,6·10⁻⁵ m³·s⁻¹.

Per aquests valors de cabal observats, cal determinar si el valor màxim i mínim d'aquest, corresponent a 5,6·10⁻⁵ i 1,7·10⁻⁵ m³·s⁻¹ respectivament, la velocitat es manté dins un rang adequat, que es situa entre els 10⁻² i 10⁻³ m·s⁻¹. Tenint en compte que la secció del tub

per on circula el líquid refrigerant és de 10^{-2} m^2 , s'obtenen unes velocitats de $5,6 \cdot 10^{-3}$ i $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, valors que es troben dins el rang determinat.

Per últim, es vol estudiar lleugerament la quantitat de potència que es genera mitjançant la pila PEM d'alta temperatura al llarg del dia que s'ha simulat. Les representacions de la potència elèctrica i calorífica es poden observar en la Fig. 8.38.

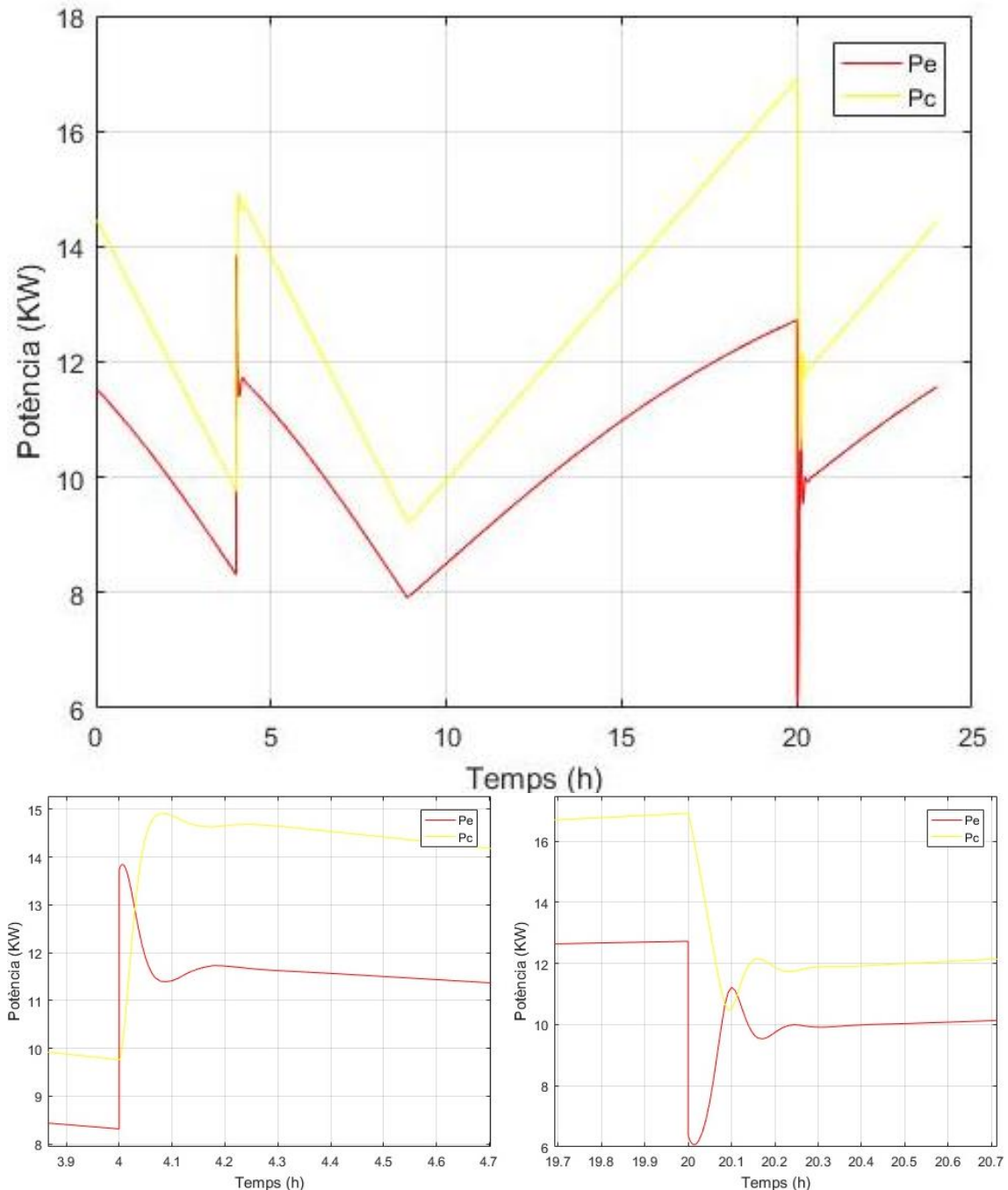


Fig. 8.38. Potència elèctrica i calorífica generada amb els perfils aplicats.

L'evolució de les potències generades al llarg del dia és molt semblant a l'evolució del corrent de la pila, com és obvi, ja que el valor d'aquest corrent és el que determina la

potència màxima que es pot generar, la potència elèctrica que es genera i, en conseqüència, la potència calorífica que es genera.

Així doncs, la potència calorífica generada inicialment correspon a 14,5 KW, mentre que l'elèctrica inicial és de 11,5 KW. A partir d'aquí, ambdues baixen amb una lleugera forma de corba fins el punt on s'aplica el graó, on aquestes valen uns 9,75 i 8,5 KW respectivament fins a valors lleugerament superiors als inicials, als quals s'arriba en el cas de la calorífica en forma de resposta directa amb un lleuger sobrepuig, mentre que l'elèctrica augmenta immediatament i fins un valor de 13,75 KW, per baixar després fins el valor semblant a l'inicial.

Aquestes potències, aleshores, segueixen decreixent fins el punt del canvi de pendent, on també s'observa que la diferència entre potència calorífica i elèctrica generada s'ha reduït al seu punt mínim, i a partir d'aquest punt aquestes comencen a augmentar el seu valor amb una lleugera forma de corba i també a distanciar-se amb un augment més elevat de la potència calorífica. En el punt del canvi de pendent, els seus valors són de 9,25 i 8 KW respectivament.

L'augment es produeix fins les 20 hores de simulació, punt on s'aplica el segon graó en el setpoint de la temperatura de l'habitatge, en el qual aquestes potències corresponen a 16,9 i 12,7 KW respectivament, i passen a 12 i 10 KW d'una forma molt semblant a l'altre graó, en què la calorífica ho fa amb una resposta amb una lleugera oscil·lació al voltant dels 12 KW, i l'elèctrica baixa immediatament fins els 6 KW per situar-se després, amb una forta oscil·lació, en els 10 KW. Ambdues potències augmenten després fins el final de la simulació, on es situen amb els mateixos valors inicials.

Cal dir, però, que la potència calorífica generada coincideix sempre amb la potència rebuda per l'habitatge, ja que no s'han considerat pèrdues en cap intercanvi de calor. Tot i així, en cas que es donessin aquestes pèrdues, l'únic que caldria seria un lleuger augment en la potència generada per tal de fer arribar a l'habitatge la mateixa potència que en el cas actual. A més, de fet, aquestes pèrdues són majoritàriament pèrdues de calor amb l'exterior que, en aquest cas, és el mateix habitatge que es vol escalfar. Amb l'anàlisi d'aquestes potències, es pot donar per tancat l'anàlisi del model tant en llaç obert com en llaç tancat.

8.5. Conclusions de l'anàlisi del sistema en llaç tancat

Després de realitzar tot un estudi de les respostes del sistema amb el seu sistema de control, es poden extreure algunes conclusions principals, que resumeixen el que s'ha analitzat en els últims apartats.

De la resposta a la temperatura exterior, es pot determinar que el sistema és capaç de funcionar amb una bona resposta en el rang de temperatures de 279 a 288 K. Les

respostes són ràpides en tots els casos, i l'únic fet que surt de la normalitat és la temperatura de l'aigua de calefacció, els increments de la qual s'allunyen en alguns casos dels desitjats. Tot i així, no és un fet crític, ja que aquestes diferències són només una recomanació i, de fet, en molts casos la calefacció encara es realitza a temperatures superiors i inferiors.

De la resposta a la temperatura de setpoint de l'habitatge, es determina que aquesta ha d'estar entre els 289 i els 298 K per a un bon funcionament. Les respostes en aquest cas també són ràpides, i es dona el mateix problema amb l'aigua de calefacció. De fet, les respostes són bastant semblants a les anteriors. En els dos casos, en aplicar graons crítics la temperatura de la pila té un pic molt proper a la temperatura en què es posa el límit de treball.

Finalment, de l'estudi de la resposta als perfils de temperatura aplicats, es pot concloure que el sistema és capaç de respondre en un dia normal del mes de gener, però cal tenir en compte que en els punts on s'apliquen els graons de la temperatura de setpoint de l'habitatge, la temperatura de la pila assoleix pics molt allunyats del punt nominal. Per això, es podria optar per suavitzar els graons aplicant filtres abans de l'entrada al sistema.

9. Anàlisi de l'impacte del sistema

En aquest capítol es realitza un anàlisi de l'impacte que comporta la implementació del sistema descrit en aquest projecte a nivell econòmic, ambiental i social. En tots aquests es compara el sistema en qüestió amb els altres sistemes que s'utilitzen per la mateixa aplicació, i es valoren els avantatges i inconvenients que presenta.

9.1. Impacte econòmic

A nivell econòmic, cal distingir tres apartats força diferenciats, sobretot el primer respecte els altres dos. Aquests consisteixen, respectivament, en la inversió en investigació que es requereix de cara a la implementació d'aquests sistemes amb plena fiabilitat i capacitat de competència en el mercat, en segon lloc el cost de compra i implementació d'un sistema en l'habitatge en concret i per últim el cost de funcionament i manteniment del sistema.

Pel que fa al primer tipus de costos, el que fa referència a la inversió en investigació, no val la pena comparar-ho amb els altres mètodes, ja que aquests estan plenament desenvolupats i no requereixen d'aquesta inversió. Si es realitza aquesta inversió és majoritàriament pel futur que es preveu, en el qual hi haurà una manca de combustibles fòssils i un planeta terra extremadament contaminat. Es pot considerar que aquesta inversió es produirà i la cobriran les empreses que pretenguin fer negoci de les tecnologies de l'hidrogen ajudades pels governs tenint en compte aquests factors, i no es té en compte de cara a comparar amb la resta de mètodes.

De cara als costos de compra i d'implementació del sistema en un habitatge, el preu d'un sistema de cogeneració basat en una pila PEM d'alta temperatura de 10 KWe (molt semblant a la del projecte) és de 3100 € [29].

Cal comparar aquest cost amb el d'altres alternatives per la mateixa aplicació i que subministren una potència semblant, com per exemple una caldera elèctrica de 15 KW, amb un cost al voltant dels 1600 € [23] o una caldera de gas de 20 KW, amb un cost aproximat de 2000 € [23].

Així doncs, en aquest sentit, el sistema que representa una reducció en el cost de compra més elevat és la caldera elèctrica, que implicaria un estalvi de 1500 €, mentre que amb la caldera de gas és d'uns 1100 € només en la inversió inicial.

Per últim, cal realitzar una comparació dels costos de funcionament, tenint en compte el cost del combustible (hidrogen, gas natural) en els casos de la pila PEM, la caldera de gas i el cost de l'electricitat en el cas de la caldera elèctrica. En tots els casos, cal tenir en compte l'estalvi energètic degut a la generació de potència elèctrica i de potència

calorífica. La comparativa es fa del cost d'operació en els tres mesos més freds de l'any.

Per calcular el cost del combustible en el cas de la pila PEM, cal conèixer primer quina és la demanda d'hidrogen d'aquesta. En la bibliografia, s'ha pogut trobar el valor de $0,75 \text{ Kg}\cdot\text{h}^{-1}$ per una pila de 10 KWe (aproximadament la potència mitjana de la pila d'aquest projecte) [30].

El preu de l'hidrogen pren valors molt diferents, segons el procés que s'hagi emprat per generar-lo. Si aquest s'obté de l'electròlisi de l'aigua, emprant energia eòlica per realitzar-la, el preu de l'hidrogen es troba al voltant dels 3,5 €/Kg, que correspon a una despesa diària de 63 € tenint en compte la producció d'ambdues energies (10 KWe i 13 KW calorífics). Es considera que aquest cost ja inclou el lloguer de les bombones d'hidrogen.

Per simplificar els càlculs, es considera que el sistema funciona a la mateixa potència de 10KWe els 3 mesos més freds de l'any, desembre, gener i febrer, i que la resta de l'any està apagat. Aquest fet suposa una despesa en aquests tres mesos de 5670 €. Aquest fet, però, es podria veure reduït si s'integrés en el sistema un reformador d'hidrogen, ja que només caldria una inversió inicial i el preu de l'hidrogen seria el preu de cost del gas natural més el de l'energia necessària de reformat, que no és massa elevat.

Un habitatge mitjà espanyol consumeix 4800 KWhe [31] anuals destinats al consum general sense tenir en compte la calefacció, que corresponen a 1200 KWhe en els tres mesos que s'estudien. Per tenir un marge d'energia pel funcionament de la pila (bombes, vàlvules, posada en marxa), es compta que l'habitatge en qüestió consumeix 1600 KWhe en els tres mesos.

L'energia elèctrica produïda en aquests tres mesos per la pila és de 21600 KWh, i per tant s'obté un excedent de 20000 KWh. Degut que no es disposa d'un preu de venda d'energia retornada a la xarxa, es compta que aquest correspon aproximadament al preu de venda de $0,14 \text{ €}\cdot\text{KWh}^{-1}$ [32], obtenint uns ingressos de 2800 € per la venda de l'energia. Tenint en compte aquest fet, la despesa neta d'aquest sistema correspon a 2870 €.

Per comparar els valors obtinguts amb la resta de sistemes, cal conèixer el cost de funcionament d'aquests. El preu de l'energia elèctrica ofert per les companyies elèctriques ronda els $0,14 \text{ €}\cdot\text{KWh}^{-1}$ [32]. Tenint en compte que el consum diari d'energia elèctrica per abastir l'habitatge correspondria a 13,3 KWh (corresponents als 1200 KWhe entre els 90 dies dels mesos en concret) destinats a electricitat, més uns 328,8 KWh per alimentar la caldera elèctrica de rendiment del 95% [23], es requereixen en total 342,1 KWh, que corresponen a un preu diari de 48 €, i en els tres mesos en concret, el preu seria de 4320 €.

Pel que fa a la caldera de gas, l'energia elèctrica caldria seguir consumint-la de la xarxa,

per tant els 13,3 KWh diaris es seguirien requerint, mentre que la calderes de gas, amb una eficiència al voltant del 90 % [33], consumiria per donar els 13 KW de potència calorífica requerits, 347 KWh diaris. El preu del KWh obtingut mitjançant gas natural és d'uns 0,05 €·KWh⁻¹ [34], i per tant, el preu diari correspondria a 17,3 €, donant un cost total en els 3 mesos de 1740 €.

Cal dir, però, que els consums energètics en calefacció que s'han tingut en compte són molt elevats, ja que en aquest cas s'ha tingut en compte un funcionament continu, les 24 hores del dia dels 90 dies corresponents als 3 mesos estudiats. Tot i així, aquest fet s'ha realitzat en els tres casos i, per tant, es pot fer una comparació entre ells.

Tenint en compte el cost de funcionament, si el preu de venda del KWh elèctric es troba al voltant del que s'ha assignat, i aquesta venda es permet per part de les companyies elèctriques, el sistema de cogeneració estudiat en el projecte és més rentable que no pas la caldera elèctrica. Tot i així, aquest sistema té un cost més de dues vegades superior al del sistema basat en una caldera de gas (2870 € contra 1740 € de la caldera de gas).

Així doncs, queda plasmada la necessitat de desenvolupar mètodes d'obtenció d'hidrogen que redueixin el preu d'aquest, ja que actualment és el principal factor que encareix aquests sistemes, juntament amb el preu d'inversió inicial, que és entre 1,5 i 2 vegades superior en el cas de la pila que en els altres dos tipus de sistema. L'altre opció, però, consisteix en obtenir l'hidrogen i l'energia de reformat in situ, mitjançant una font d'energia renovable. Aquest fet reduiria el preu de l'hidrogen a valors ínfims, i el sistema passaria a ser molt més barat.

9.2. Impacte ambiental i energètic

Un dels principals objectius de la implementació de sistemes com el d'aquest projecte és el de reduir la contaminació emesa en els processos d'obtenció i transformació d'energia, a més de trobar una alternativa als combustibles fòssils finits. Cal realitzar un anàlisi de tot el cicle energètic per determinar si aquests objectius s'assoleixen o no.

En aquest sentit, sembla evident que la problemàtica pel que fa als recursos finits de combustible queda solucionada, ja que aquests sistemes, tot i que en molts casos poden funcionar a partir d'hidrogen obtingut a partir d'hidrocarburs, que al seu temps han estat obtinguts del petroli, pot funcionar també a partir d'hidrogen obtingut per electròlisi de l'aigua, a partir de fonts primàries renovables.

El debat es genera per tant quan es discuteix la rendibilitat i sostenibilitat del procés que s'emptra per obtenir aquest hidrogen. En un inici, els sistemes com el presentat en aquest projecte es presenten com una possibilitat d'obtenir una energia lliure d'emissions, degut que en el procés que es du a terme en el si de la pila no emet gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera, i només té com a producte aigua.

Però no és correcte parlar d'energia lliure d'emissions si en el mètode d'obtenció de l'hidrogen s'han utilitzat matèries primeres provinents del petroli, com per exemple hidrocarburs lleugers, o si la gran quantitat d'energia emprada en el sistema de reformat s'obté a partir de la combustió d'hidrocarburs o d'energia elèctrica de la xarxa, en molts casos provinent d'energies no renovables.

Segons fonts bibliogràfiques, les emissions en emprar gas natural i gasoil per produir energia corresponen a 0,2 i 0,26 Kg CO₂·KWh⁻¹ [35] respectivament, mentre que les emissions per obtenir una quantitat d'hidrogen amb una energia equivalent oscil·len entre els 0 Kg CO₂·KWh⁻¹ emprant energia eòlica en l'electròlisi i els 0,44 Kg CO₂·KWh⁻¹ emprant energia provinent de la xarxa elèctrica. En el cas de l'hidrogen provinent del reformat del gas natural, aquest valor correspon a 0,29 Kg CO₂·KWh⁻¹ [36]. Com es pot veure amb l'ampli rang de valors, el mètode d'obtenció de l'hidrogen té molta influència en les emissions finals.

Així doncs, queda palès que tot i que el sistema pot arribar a tenir zero emissions, cal dur a terme tots els processos de manera sostenible, i no és suficient tenir en compte que en el procés de la pila les emissions són nul·les, sinó que en tot el procés complet les emissions siguin nul·les o les mínimes possibles. Per aquest fet cal millorar els mètodes d'obtenció d'hidrogen per fer-los sostenibles, i així donar sentit a aquests sistemes.

9.3. Impacte social

Tot sistema innovador ha de vèncer certes inquietuds per part de la societat quan encara es troba en el seu procés d'implantació, degut que la societat tendeix a ser conservadora de cara a realitzar inversions d'un volum econòmic d'aquest caire. Per aquest fet, s'han de demostrar molt clarament els avantatges que aquests mètodes representen respecte els mètodes convencionals, i fer-ho de forma que la societat ho entengui com una opció més econòmica i sostenible.

Per aquest fet, cal que els governs i representants dels països s'involucrin en aquest tema, i s'estableixin campanyes per promoure aquests sistemes, ja siguin campanyes de finançament mitjançant ajudes econòmiques, o campanyes de conscienciació ambiental i de publicitat d'aquests nous sistemes.

Tot i la situació actual pel que fa a la contaminació i a l'escassetat de combustibles fòssils, l'actitud dels governs d'alguns països ha sigut totalment contrària a aquesta, posant traves de cara a la implementació d'aquests sistemes, empitjorant-ne la rendibilitat mitjançant lleis que prohibeixen la venda de l'energia produïda de forma neta o aplicant impostos als usuaris de sistemes de generació d'energies renovables. La forta connexió entre governants i alts càrrecs d'empreses energètiques fa que les lleis vagin en l'altra direcció, i així afavoreixin el consum d'energies obtingudes amb mètodes tradicionals.

Conclusions

Per concloure la realització del projecte, cal extreure conclusions dels diferents apartats que s'han dut a terme, tenint en compte els objectius proposats.

Inicialment, de la documentació teòrica recopilada, es pot afirmar que la preocupació pel medi ambient i per la falta de recursos energètics és present en la comunitat, i que el desenvolupament de sistemes com l'estudiat en aquest projecte són necessaris per suplir una demanda imminent.

A més, d'entre tots aquests sistemes, els que es basen en les piles PEM d'alta temperatura són molt prometedors, degut als seus múltiples avantatges respecte els altres tipus de sistemes, i encara més si s'incorpora un sistema de cogeneració que augmenti l'eficiència del sistema a valors molt elevats.

Després de realitzar el disseny del sistema de cogeneració i el seu corresponent model dinàmic, i d'analitzar els resultats obtinguts en diferents simulacions, es pot afirmar que el sistema té la capacitat suficient per satisfer els requeriments d'una aplicació com la que s'ha plantejat, sempre i quan el sistema de generació d'energia estigui dimensionat per aportar l'energia necessària al sistema.

Pel que fa al model utilitzat, s'han fet diverses simplificacions i en aquest sentit, en un futur cal substituir l'equació de la corba de polarització de la pila per un bloc dinàmic que en representi un funcionament més precís, tenint en compte les circumstàncies en què aquesta es troba o la degradació que aquesta pot sofrir entre d'altres.

Pel que fa al sistema de refrigeració de la pila, encara que s'ha utilitzat un model molt simplificat, es pot afirmar que el sistema basat en plats de refrigeració amb aigua com a líquid refrigerant és suficient per assolir els valors de temperatura desitjats. De cara al futur, un model que tingui en compte els perfils de temperatura dins el propi sistema de la pila pot incrementar la precisió, i reflectir amb més encert el sistema real. D'altra banda, cal estudiar si el fet que la temperatura del refrigerant sigui tant propera a la de la pila pot causar problemes, i millorar el sistema de refrigeració per solucionar-lo.

En la part que correspon al sistema de calefacció, el model mostra un funcionament molt bo, amb unes temperatures de l'aigua en el punt de treball nominal que corresponen a les recomanades, i amb una temps de resposta a les pertorbacions externes molt curt. Cal millorar, però, els valors obtinguts en la temperatura de l'aigua quan es treballa fora del punt nominal, mitjançant un sistema de control més complex que sigui capaç de regular aquest valor. El sistema de control que s'ha dissenyat ha ofert molt bons resultats, però seria molt limitat en cas que es volgués treballar en punts més allunyats del nominal.

A més, tot i que els rangs de temperatures de treball obtinguts satisfan la necessitat de calefacció en l'aplicació, ja que han estat dimensionats per aquest fet, amb un estudi més acurat en aquest àmbit es podrien assolir valors encara més òptims. Per aquest fet, cal que els intercanvis de calor siguin més eficients, i també afegir en aquests un factor de pèrdues que es correspongui amb els casos reals.

Per últim, en la comparativa amb la resta de mètodes emprats per aplicacions similars, queda clar que de cara a millorar la viabilitat econòmica, cal reduir el preu de producció d'hidrogen, ja que l'elevat preu d'aquest és el que més influeix en els costos finals. Aquest fet, juntament amb què les tècniques de producció d'aquest hidrogen actualment poden arribar a ser més contaminants que els mètodes convencionals, fan que s'hagi d'anar amb compte a l'hora de fer certes afirmacions respecte aquests mètodes, ja que és cert que poden presentar uns avantatges considerables econòmicament i ambiental, sempre i quan la implementació sigui la correcta, i no s'estigui contaminant en altres punts del procés energètic.

Agraïments

Cal fer un reconeixement a totes les persones que han contribuït que aquest projecte s'hagi pogut realitzar. Principalment, agrair els directores d'aquest projecte, la Dra. Maria Serra i el Dr. Ramon Costa, que han sabut resoldre tots els dubtes plantejats i han donat suport constant per ajudar a superar les dificultats sorgides al llarg de la realització.

Juntament amb ells, agrair a tots els membres de l'IRII de la UPC, en concret als integrants del laboratori de piles per la bona acollida rebuda per part seva i les hores compartides.

Finalment, agrair la família i els amics pel suport tant econòmic com moral que han aportat, sense dubtar ni un moment de la meua capacitat per finalitzar amb èxit tant aquest projecte com el grau complet.

Bibliografia

- [1] Colleen Spiegel, *PEM Fuel Cell: Modeling and Simulation using MATLAB*. 2008.
- [2] R. P. O'Hayre, F. B. Prinz, S.-W. Cha, and W. Colella, "Fuel Cell Fundamentals," *Wiley*, vol. 2nd editio, 2008.
- [3] J. T. Pukrushpan, H. Peng, and A. G. Stefanopoulou, "Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 126, no. 1, p. 14, 2004.
- [4] F. Barbir, *PEM Fuel Cells*, no. Dc. 2013.
- [5] A. Chandan *et al.*, "High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) – A review," *Journal of Power Sources*, vol. 231, no. May 2016, pp. 264–278, 2013.
- [6] C. de Beer, P. S. Barendse, P. Pillay, B. Bullecks, and R. Rengaswamy, "Classification of High-Temperature PEM Fuel Cell Degradation Mechanisms Using Equivalent Circuits," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 5265–5274, 2015.
- [7] S. J. Andreasen and S. K. Kær, "Modelling and evaluation of heating strategies for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stacks," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 17, pp. 4655–4664, 2008.
- [8] H. R. Ellamla, I. Staffell, P. Bujlo, and B. G. Pollet, "Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector," *Journal of Power Sources*, vol. 293, pp. 312–328, 2015.
- [9] A. V. Vargas, J. Patricio, I. Rivera, A. S. Oses, and R. A. E. González, "Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas," no. 1110116, 2014.
- [10] "Clima Barcelona: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Barcelona - Climate-Data.org." [Online]. Available: <http://es.climate-data.org/location/1564/>. [Accessed: 08-Dec-2016].
- [11] R. N. Basu, J. Mukhopadhyay, and A. Das Sharma, "High temperature fuel cell," vol. 81, no. 4, pp. 841–864, 2015.
- [12] P. Bujlo *et al.*, "Validation of an externally oil-cooled 1 kWel HT-PEMFC stack operating at various experimental conditions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 23, pp. 9847–9855, 2013.
- [13] E. Harikishan Reddy and S. Jayanti, "Thermal management strategies for a 1 kWel stack of a high temperature proton exchange membrane fuel cell," *Applied Thermal Engineering*, vol. 48, pp. 465–475, 2012.
- [14] F. C. Chen, Z. Gao, R. O. Loutfy, and M. Hecht, "Analysis of Optimal Heat Transfer in a PEM Fuel Cell Cooling Plate," *Fuel Cells*, vol. 3, no. 4, pp. 181–188, 2003.
- [15] G. Zhang and S. G. Kandlikar, "A critical review of cooling techniques in proton

- exchange membrane fuel cell stacks,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2412–2429, 2012.
- [16] S. Asghari, H. Akhgar, and B. F. Imani, “Design of thermal management subsystem for a 5 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3141–3148, 2011.
- [17] T.-W. Song, K.-H. Choi, J.-R. Kim, and J. S. Yi, “Pumpless thermal management of water-cooled high-temperature proton exchange membrane fuel cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 10, pp. 4671–4679, 2011.
- [18] “dobletub_contracorrent.” [Online]. Available: http://www.epsem.upc.edu/intercanviadorsdecalor/dobletub_contracorrent.html. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [19] “Engineering Page > Heat Exchangers > Typical Overall Heat Transfer Coefficients.” [Online]. Available: <http://www.engineeringpage.com/technology/thermal/transfer.html>. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [20] S.-J. Wang, W.-W. Huo, Z.-Q. Zou, Y.-J. Qiao, and H. Yang, “Computational simulation and experimental evaluation on anodic flow field structures of micro direct methanol fuel cells,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2877–2884, 2011.
- [21] UPONOR, “Instalaciones de fontanería y calefacción, Manual técnico.”
- [22] “Standard Pipe Schedules and Sizes Chart Table Data - Engineers Edge.” [Online]. Available: http://www.engineersedge.com/pipe_schedules.htm. [Accessed: 15-Dec-2016].
- [23] Baxi, “CATÁLOGO TARIFA 2015,” 2015.
- [24] L. S. De Todos, “Guía sobre las claves para la optimización de las instalaciones de calefacción individuales.”
- [25] C. Nacional, D. Investigación, D. Tecnológico, E. Daniela, and L. López, “Tesis de maestría en ciencias,” 2007.
- [26] V. De In, “Cálculo de emisión calorífica Variación de la emisión calorífica,” pp. 165–171.
- [27] “PID Tuning - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/discovery/pid-tuning.html>. [Accessed: 29-Dec-2016].
- [28] Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Tercera ed. .
- [29] M. Wei, H. Breunig, M. Stadler, T. Mckone, D. Ho, and R. Tyler, “A Total Cost of Ownership Model for PEM Fuel Cells in Combined Heat and Power and Backup Power Applications - DOE Hydrogen and Fuel Cells Program FY 2014 Annual Progress Report,” pp. 196–200, 2014.
- [30] “El Hidrógeno.” [Online]. Available: http://aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44

- &Itemid=41&lang=es. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [31] “Consumo de electricidad medio de una vivienda en España.” [Online]. Available: <http://tarifasgasluz.com/faq/consumo-electricidad-hogares/espana>. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [32] “Tarifaluzhora.” [Online]. Available: <http://tarifaluzhora.es/>. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [33] “How Efficient is a Condensing Boiler? | GreenMatch.” [Online]. Available: <http://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/how-efficient-is-a-condensing-boiler>. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [34] “Precio kWh gas natural.” [Online]. Available: <http://precioagas.com/conceptos/precio-kwh>. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [35] C. Zaragoza, “calculoemisiones.” .
- [36] “Reformado de metanol para la obtencion de hidrogeno 2.” [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/bluemyle/reformado-de-metanol-para-la-obtencion-de-hidrogeno-2>. [Accessed: 13-Jan-2017].
- [37] “Toyota Global Site | FCV Fuel Cell Vehicle.” [Online]. Available: http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/. [Accessed: 15-Nov-2016].
- [38] The Exchange Technology, “Hydrogen proton-conducting fuel cell.” [Online]. Available: <http://www.theexchange.technology/man>. [Accessed: 27-Oct-2016].
- [39] “Nafion™_US.” [Online]. Available: <http://www.nafionstore.com/store/pg/19-Nafion-US.aspx>. [Accessed: 29-Oct-2016].
- [40] J. P. Owejan, J. E. Owejan, and W. Gu, “Impact of Platinum Loading and Catalyst Layer Structure on PEMFC Performance,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 160, no. 8, pp. F824–F833, May 2013.
- [41] O. Shamardina, A. Chertovich, A. A. Kulikovskiy, and A. R. Khokhlov, “A simple model of a high temperature PEM fuel cell,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 18, pp. 9954–9962, 2010.
- [42] “Dos viviendas en el casco antiguo de Vigo | Villacé y Cominges.” [Online]. Available: <http://veredes.es/blog/dos-viviendas-en-el-casco-antiguo-de-vigo-villace-y-cominges/>. [Accessed: 06-Dec-2016].